



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SROVNÁNÍ OXIDAČNÍHO A TAVNÉHO LASEROVÉHO
DĚLENÍ MATERIÁLU DC01**

COMPARISON OF FLAME AND FUSION LASER CUTTING OF MATERIAL DC01

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Krejčířík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Marek Krejčířík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Srovnání oxidačního a tavného laserového dělení materiálu DC01

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se s technologií tavného a oxidačního dělení materiálu DC01 pomocí laseru. Osvojení měření drsnosti řezné hrany kontaktním drsnoměrem.

Cíle bakalářské práce:

Nastudovat technologii laserového dělení materiálu a zhodnotit současný stav.

Osvojit si návrh a vyhodnocení experimentu.

Změřit drsnost vyřezaných vzorků a jejím základě posoudit, který režim je vhodnější z hlediska drsnosti a výrobního času.

Seznam doporučené literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavatelství STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KREJČÍŘÍK Marek: Srovnání oxidačního a tavného laserového dělení materiálu DC01

Tato bakalářská práce se zabývá technologií laserového dělení a drsností řezných hran pro nízkouhlíkovou ocel DC01. Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a experimentální.

Teoretická část se zabývá laserem jako takovým. Je popsána fyzika paprsku spolu s konstrukcí laseru, rozřazení podle aktivního prostředí či použití laserových zařízení v dnešním strojním průmyslu. Poslední část teoretické části je věnována drsnosti povrchu, jeho parametrům a měřicí technice.

Experimentální část se věnuje, jak z názvu vyplývá, srovnání drsností řezných hran materiálu DC01 po laserovém dělení metodou oxidační s metodou tavnou. Naměřené parametry drsnosti byly dále porovnávány s normou ČSN EN ISO 9013.

Klíčová slova: Laser, oxidační laserové dělení, tavné laserové dělení, nízkouhlíková ocel DC01, drsnost, drsnosti řezných hran, parametry drsnosti, měření drsnosti řezných hran

ABSTRACT

KREJČÍŘÍK Marek: Comparison of flame and fusion laser cutting of material DC01

This thesis is focused on the technology of laser cutting together with edge roughness for low carbon steel material DC01. The thesis is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part examines laser itself and contains a physical description of the laser beam with the laser construction, division according to the active environment or the occurrence of laser devices in today's engineering industry. The last part of the theoretical research is aimed to the surface roughness, its parameters and the measuring technology.

The practical part is focused on the comparison of the edge roughness of material DC01 after laser cutting with the usage of flame and fusion. The measured parameters of roughness were further compared with the norm ČSN EN ISO 9013.

Keywords: Laser, flame laser cutting, fusion laser cutting, low carbon steel DC01, roughness, edge roughness, parameters of roughness, measuring the roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍŘÍK, Marek. Srovnání oxidačního a tavného laserového dělení materiálu DC01 [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132377>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa. Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za vstřícnost, velmi cenné rady, připomínky a materiály. Dále bych chtěl poděkovat firmě LASERCORE s.r.o., která mi umožnila využít laserovou techniku a materiál pro měření a také mi poskytla své mnoholeté zkušenosti a cenné rady. Poděkování patří také mé rodině, která mi byla za celou dobu bakalářského studia oporou.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
-------------------	----------

1 LASER.....	10
---------------------	-----------

1.1 Fyzikální princip laserového paprsku	10
--	----

1.2 Rozdělení laserů	11
----------------------------	----

1.2.1 Pevnolátkové lasery	12
---------------------------------	----

1.2.2 Kapalinové lasery.....	14
------------------------------	----

1.2.3 Plynové lasery	14
----------------------------	----

1.2.4 Polovodičové lasery	15
---------------------------------	----

2 LASEROVÁ TECHNOLOGIE	16
-------------------------------------	-----------

2.1 Laserové řezání.....	16
--------------------------	----

2.1.1 Druhy metod podle řezného plynu.....	17
--	----

2.1.2 Řezné parametry	18
-----------------------------	----

2.2 Laserové svařování.....	20
-----------------------------	----

2.3 Laserové vrtání	21
---------------------------	----

2.4 Laserové opracování povrchu.....	21
--------------------------------------	----

3 POVRCHOVÁ DRSNOST.....	23
---------------------------------	-----------

3.1 Měření struktury povrchu	23
------------------------------------	----

3.1.1 Definice parametrů drsnosti	23
---	----

3.1.2 Metody měření drsnosti povrchu	26
--	----

3.2 Norma ČSN ISO 9013	27
------------------------------	----

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
------------------------------------	-----------

4.1 Použitý materiál	29
----------------------------	----

4.2 Laserové dělení materiálu.....	29
------------------------------------	----

4.3 Měření drsnosti řezných hran	31
--	----

4.4 Vyhodnocení experimentu.....	33
----------------------------------	----

5 ZÁVĚRY	35
-----------------------	-----------

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [2], [3], [4]

Laserový paprsek je v průmyslu zařazen do tzv. nekonvenčních technologií. Jedná se o technologie, při kterých se nevyužívá řezný nástroj (tzv. bezsilové působení na obrobek) a netvoří se tříska, jako u konvenčních technologií. K úběru obráběného materiálu dochází tepelnými, chemickými nebo abrazivními (mechanickými) účinky. V současné době jsou kladeny stále vyšší nároky na kvalitu, ekonomiku a ekologii při výrobním procesu. Těchto cílů může být dosaženo právě díky nekonvenčním technologiím. Nekonvenční technologie můžeme rozdělit do několika kategorií, které se od sebe liší způsobem a principem obrábění materiálu.

Laserová technologie se stala za skoro šedesát let své existence nedílnou součástí dnešního světa a má před sebou velkou budoucnost. Stále náročnější požadavky konstruktérů a zákazníků na přesnost výroby, tvarovou složitost, obrábění nových (dříve těžko obrobitelných) materiálů a v neposlední řadě úsporu strojního času a ekonomiku výroby, ženou tuto technologii kupředu. Klesající pořizovací cena a možnost repasování přístrojů, které prodlouží jejich životnost v řádu několika let, způsobuje růst poptávky po těchto technologiích.

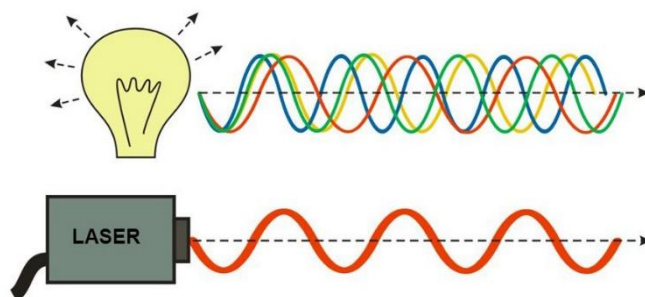
S využitím laseru, jako přístroje se můžeme setkat v medicíně, vojenském, automatizačním, vesmírném, strojírenském průmyslu a v mnoha dalších odvětvích. Princip a konstrukce je u všech laserových zařízení stejný.

1 LASER [2]

Slovo laser je složeno z anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, neboli zesílení světla pomocí vynucené stimulované emise, jehož princip je popsán kvantovou mechanikou. Laserový paprsek je charakteristický svojí koherentností a monochromaticností.

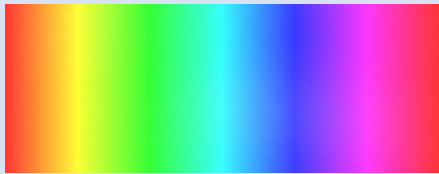
1.1 Fyzikální princip laserového paprsku [2], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]

Laserový paprsek je optické vlnění, které patří do skupiny elektromagnetického záření. Od jiných druhů záření se liší vlnovou délkou viditelného záření. Podstatou je, že elektromagnetická vlna určité frekvence vynucuje přechod atomu z vyšší hladiny na hladinu nižší. Z termodynamického hlediska můžeme říci, že laser je přístroj, jehož entropie se zmenšuje, přičemž spotřebovává určité množství energie. Mezi charakteristické vlastnosti laserového paprsku patří koherentnost, monochromaticnost a směrovost (viz obr. 1). Z toho vyplývá, že laserový paprsek je jednobarevný s pouze jednou vlnovou délkou fotonů o stejné frekvenci a směru kmitání, který koncentruje svoji energii přesně do daného místa, a to díky rovnoběžnosti drah fotonů v důsledku jednotného aktivního prostředí. V tab. 1 jsou znázorněné spektra elektromagnetických vln.



Obr. 1 Srovnání bílého světla se světlem laseru [5]

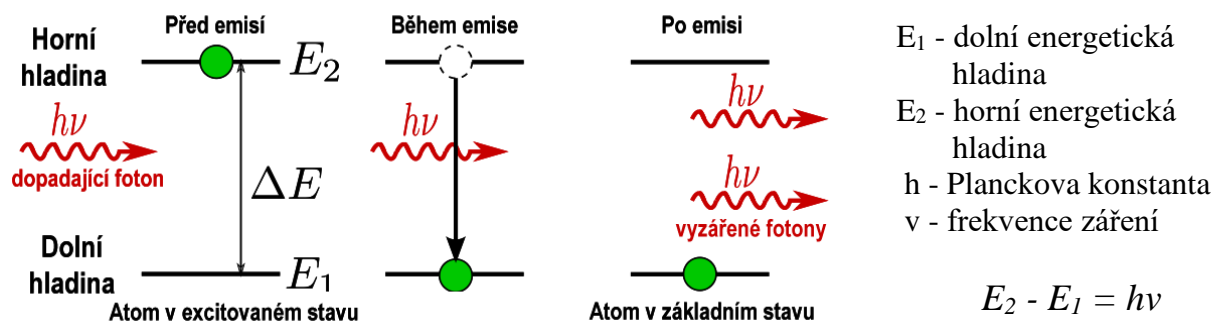
Tab. 1 Spektrum elektromagnetických vln [6], [7]

ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	VLNOVÁ DÉLKA λ	VYUŽITÍ
Rádiové záření	2000 m - 0,1 m	televize, rozhlas
Mikrovlnné záření	0,1 m - 0,3 mm	WiFi, mobilní telefony, mikrovlnné trouby
Infračervené záření	0,3 mm - 750 nm	CO ₂ laser, dálkové ovladače
Viditelné záření 	760 nm - 390 nm	viditelné světlo
Ultrafialové záření	390 nm - 10 nm	solárium, dezinfekce, přístroje ke kontrole dokladů
Rentgenové záření	10 nm - 1 pm	lékařská a průmyslová diagnostika
Záření gama	< 300 pm	jaderná fyzika

Aby došlo ke zvýšení počtu atomů ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu, je zapotřebí zajistit buzení (čerpání) aktivního prostředí. K buzení lze využít tyto druhy

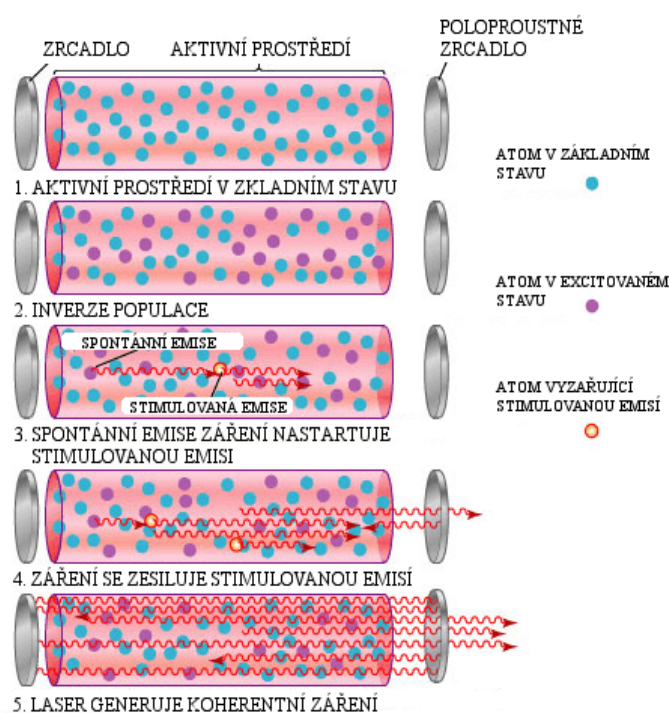
energie – optické, chemické či energie elektrickým polem (výbojka, dioda). Budeme-li na atom působit vlivem energie buzení (přesněji proudem fotonů), bude elektron nucen přejít do vyšší energetické hladiny. Tento stav je nazýván jako absorpce. Po načerpání zůstávají atomy na nežádoucí metastabilní energetické hladině do doby, než přejdou na hladinu nižší. Tato fáze přechodu je způsobená spontánní nebo stimulovanou emisí.

Celý princip vzniku laserového paprsku a jeho následná síla závisí právě na stimulované emisi, která potřebuje pro vznik vnější podmět ve formě elektromagnetického záření (fotonu). Dochází k přechodu z vyšší energetické hladiny do energetické hladiny nižší. Zbývající energie se emituje do formy laserového záření. Celý princip stimulované emise je zobrazen na obr. 2.



Obr. 2 Schéma stimulované emise [7]

Ke zvýšení intenzity fotonů vzniklých stimulovanou emisí slouží optický rezonátor. Jedná se o část prostoru, která je tvořena aktivním prostředím nacházející se ve skleněné nebo plastové trubici, která je ohraničena dvěma (konvexními nebo konkávními) zrcadly, z nichž jedno je odrazové (dielektrické) a druhé polopropustné s kovovým filmem. Polopropustné zrcadlo zajišťuje, aby stimulovaný atom setrval v aktivním prostředí do doby, dokud nebude mít dostatečnou energii k jeho překonání. Celý děj se znovu opakuje, dokud se fotony kompletně nevyzaří a atomy se nevrátí zpět na základní energetickou hladinu (obr. 3).



Obr. 3 Schéma vzniku laserového paprsku [8]

1.2 Rozdělení laserů [2], [12]

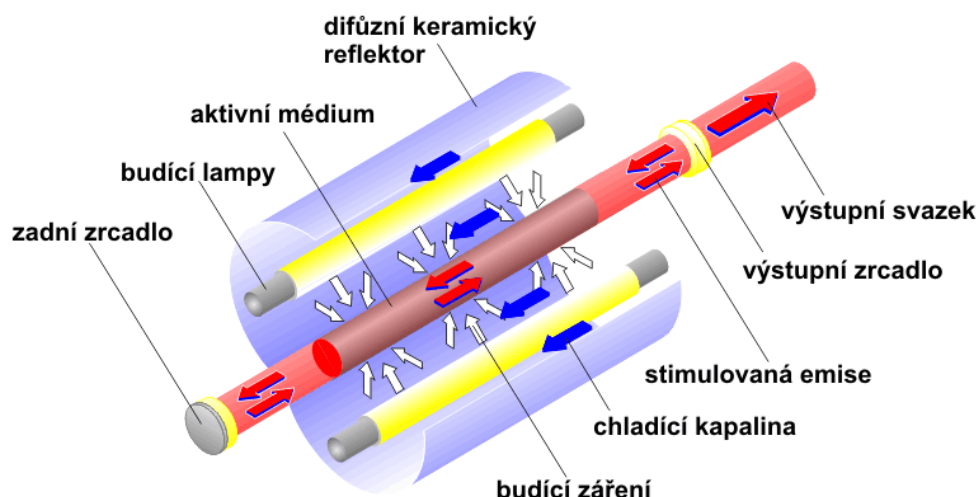
Laser v dnešní době ovlivňuje naše každodenní životy. Jak již bylo zmíněno, vývoj laserových technologií přinesl velké množství různých typů laserů s odlišnými vlastnostmi. Každý druh se liší konstrukcí a realizací jednotlivých částí, princip však zůstává stejný. Jednotlivé lasery se dělí podle mnoha kritérií. Základní rozdělení je podle:

- charakteru aktivního prostředí

- typu buzení (opticky, elektrický výboj, tepelnými změnami, chemický, ...)
- vyzařované vlnové délky
- časového provozu [kontinuální (CW) nebo pulsní (PW)]

1.2.1 Pevnolátkové lasery [13], [14], [15], [16]

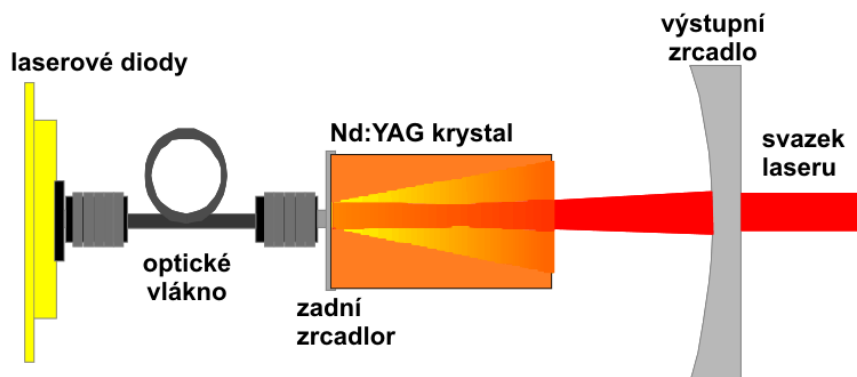
Pevnolátkové lasery neboli dielektrické lasery jsou charakteristické svým aktivním prostředím, ve kterém se používají monokrystalické nebo amorfni látky s příměsí vhodných iontů. Pevnolátkové lasery mohou pracovat v různých režimech a za různých provozních podmínek. Jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu. Jejich záření se obvykle pohybuje v oblasti infračerveného až viditelného světla.



Obr. 4 Schéma pevnolátkového laseru [15]

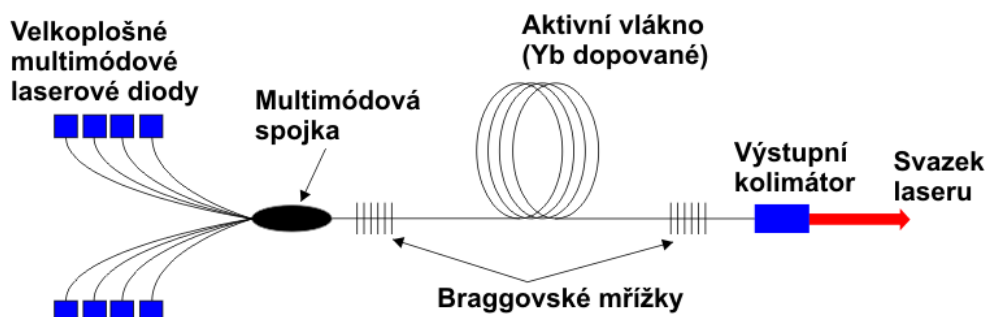
- Rubínový laser – jedná se o nejstarší druh laserového zařízení, jehož aktivním prostředím je krystal syntetického rubínu (safír) oxidu hlinitého (Al_2O_3), jehož aktivátorem jsou ionty Cr^{3+} . Pro vybudění se často využívají xenonové výbojky nebo polovodičové velkoplošné diody. Pracuje zpravidla v impulsním režimu. Během miliontiny sekundy vyzáří výkon zhruba milion wattů, proto je nutné zajistit chlazení, které je především vodní. Dnes je rubínový laser i díky svému nadprůměrně obrovskému výkonu nahrazován modernějšími pevnolátkovými lasery.
- Nd: YAG laser – nejpoužívanější laser z oblasti pevnolátkových laserů. Jeho aktivní médium je Neodymium (Nd^{3+}) a je umístěné v pevném krystalu Yt-Al granátu (opticky izotropní krystal kubické struktury), který se nachází v rezonátoru ve formě tyče. Nejčastěji je buzen xenonovou výbojkou (LPSS) nebo laserovou diodou (DPSS). V dnešní době je xenonová výbojka nahrazována právě zmiňovanou diodou, a to díky své vysoké účinnosti, malé spotřebě elektrické energie, a především nízké ceně. Avšak i přes vysokou účinnost, kterou laserová dioda má se Nd: YAG laser pohybuje svou účinností okolo 5 % i díky velkým požadavkům na chlazení. Celé schéma Nd: YAG laseru je znázorněno na obr. 5.
Charakteristická vlnová délka tohoto laseru je 1064,1 nm. S menší účinností je možné emitovat vlnové délky na 946, 1120, 1320 nebo 1440 nm. Maximální výkon v kontinuálním režimu dosahuje několika stovek wattů a v impulsním režimu v rozmezí milisekund až po jednotky pikosekund.

I díky svému vysokému výkonu a vlnové délce má Nd: YAG laser řadu uplatnění. Hlavní využití je především ve strojírenství, a to při vrtání, svařování, žíhání nebo značkování. Dále je využit například v medicíně, nebo také ve vojenských aplikacích.



Obr. 5 Schéma Nd: YAG laseru [15]

- Laser s optickými vlákny – neboli tzv. Fiber Glass laser je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí je tvořeno optickými vlákny, v jehož jádře dochází ke generování záření, přičemž vlákna jsou dopována prvky ze skupiny lanthanoidů, tedy prvky v periodické soustavě prvků s protonovým číslem 57 až 71 (nejčastěji prvky erbia nebo ytterbia). Buzení je způsobeno díky čerpacím laserovým diodám, které jsou následně vedeny přes multimódovou optickou spojku do aktivního optického vlákna. V aktivním prostředí jsou rovnoběžná zrcadla nahrazena za Braggovské mřížky. Jedná se o struktury vytvořené přímo na jádře optického vlákna, které mají za úkol změnit index lomu světla tak, jak rovinné zrcadlo. Záření je poté výstupním kolimátorem uvolněno v laserový svazek. Celý princip fiber laseru je znázorněn na obr. 6.



Obr. 6 Princip vláknového laseru [15]

Vláknové lasery prokazují svoji dominantnost na trhu v několika směrech. Především je to účinnost, která dosahuje až 35 %, nemá tak velké ztráty, a proto je možné laser chladit vzduchem. Vysoký výkon až 80 kW, kdy jedno vlákno je schopno generovat paprsek o výkonu až 500 W. Při výkonu 100 W je možné dosáhnout fokusace paprsku i hodnoty nižší než 5 μm . Největší výhody tohoto typu jsou minimální nároky na údržbu a velmi dlouhá životnost, která se pohybuje okolo 150 000 hodin. Naopak ostatní pevnolátkové lasery mají svoji životnost až 10x nižší. Vlnová délka generovaného

paprsku se pohybuje v rozmezí 1055 až 1075 nm. Vláknové lasery se v průmyslu využívají především ke svařování kovů a dodávají se s výkonem až 100 kW.

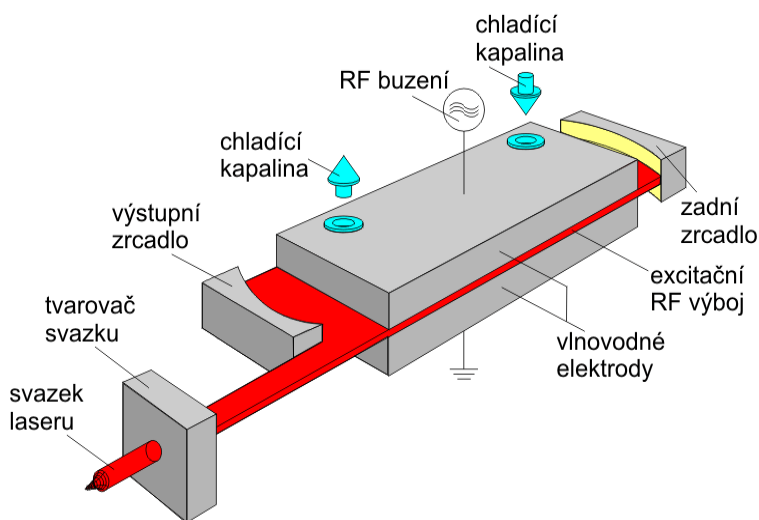
1.2.2 Kapalinové lasery [6], [13], [16]

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv, nebo roztoky metalo-organických zemin např. vodní roztoky solí. Předností kapalinových laserů je stabilita aktivního prostředí při optickém buzení a snadný odvod tepla. Výběrem různých kombinací organických barviv a zrcadel rezonátoru získáme koherentní záření v pásmu vlnových délek od 300 nm až 1500 nm. K buzení kapalinových laserů se užívá optické záření.

Využití kapalinových laserů je velmi malé. Jejich nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, které se teplem a světlem rozkládá. I tak tyto lasery našly své uplatnění ve spektrometrii nebo v medicíně.

1.2.3 Plynové lasery [3], [6], [13], [14], [15], [16]

Plynové lasery jsou nejčastější laserovou technologií. Charakteristické prostředí plynových laserů mohou tvořit atomy, ionty nebo molekuly. Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, jednoduše řečeno povaha záření má spíše lineární charakter. Při průchodu aktivním prostředím je optický svazek deformován méně než u laserů s kondenzovaným prostředím, protože plyny jsou obecně homogennější. Buzení plynových laserů je možné provádět mnoha různými metodami. Jedna z nejčastěji využívaných metod buzení je optické, elektrickým výbojem, nebo chemickou reakcí. Toto buzení probíhá v trubicích, ve kterých se nachází aktivní médium a zrcadla, která tvoří rezonátor. Schéma jednoho z typů rezonátoru plynového laseru je zobrazen na obr. 7.



Obr. 7 Schéma plynového laseru [15]

- CO₂ laser – je jedním z nejstarších, ale také nepoužívanějších plynových laserů, a to díky velkému rozsahu výstupních výkonů. Aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého (CO₂), ale také další příměsi jako je helium (He), které zajišťuje lepší odvod tepla a dusíku (N₂), který působí pozitivně na proces nabuzení. Pro správný vznik laserového paprsku je důležité, aby použité plyny měly co nejvyšší zaručenou čistotu. Tyto směsi plynů proudí ve skleněné trubici se dvěma elektrodami mezi zrcadly optického rezonátoru. Celé zařízení je pak chlazené plynem, vzduchem a vodou. Buzení je prováděno pomocí elektrického výboje, kde vzniklý laserový paprsek emituje infračervené záření o vlnové délce 10,6 μm . Účinnost se u CO₂ laseru pohybuje okolo 20 %.
- CO₂ laser s příčným tokem plynu – jedná se o velice kompaktní konstrukci. Laserový paprsek, proudění plynů a elektrický výboj proudí ve třech různých směrech. Díky přívodu plynu na osu rezonátoru, má zařízení mnohem vyšší chladicí výkon, a tím pádem můžeme dosáhnout mnohem vyšších výkonů, a to až 20kW. Kvalita laserového

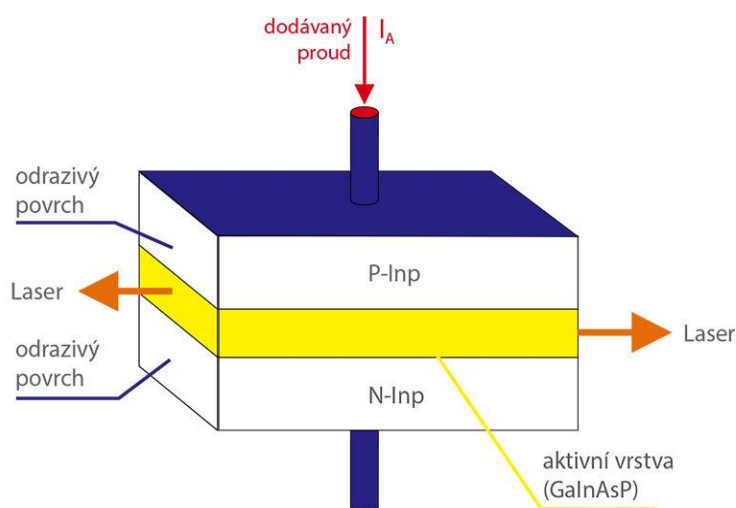
paprsku je nižší v porovnání s podélným tokem. Příčné lasery jsou díky svému výkonu využívány při svařování, a také k tepelnému zpracování.

- CO₂ laser s podélným tokem plynu – v tomto případě je tok plynu rovnoběžný se směrem paprsku nebo také se směrem normály zrcadel. Chlazení plynu probíhá mimo dutinu rezonátoru. Tento typ chlazení není příliš efektivní, na metr délky rezonátoru nedosáhneme více jak 100 W. Proto jsou pro vyšší výkony nutné delší rezonátory. Tento typ laseru se spíše využívá k laserovému řezání materiálů.

1.2.4 Polovodičové lasery [6], [13], [14], [15], [16]

Polovodičové lasery patří k nerozšířenějším laserovým zařízením. Základním aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, který se od kovu liší tím, že s rostoucí teplotou jeho vodivost roste, zatímco u kovů naopak klesá. Výběrem aktivního prostředí lze dosáhnout vlnových délek od 0,3 μm do 30 μm . Nevýhodou je však velká rozbíhavost laserového paprsku způsobená laserovou diodou, která mění elektrickou energii na světlo.

Účinnost laserové diody, která dosahuje až 50 %, zajišťuje dominanci těchto laserů na trhu. K dalším výhodám polovodičových laserů patří jejich výkon, který se dá měnit změnou elektrického proudu, nízká provozní i investiční náročnost, a také dlouhá životnost. Polovodičové lasery našly své uplatnění v průmyslu, medicíně nebo také ve výpočetní technice. V průmyslu se využívají pro řezání, svařování nebo pájení. Schéma rezonátoru polovodičového laseru je zobrazen na obr. 8.



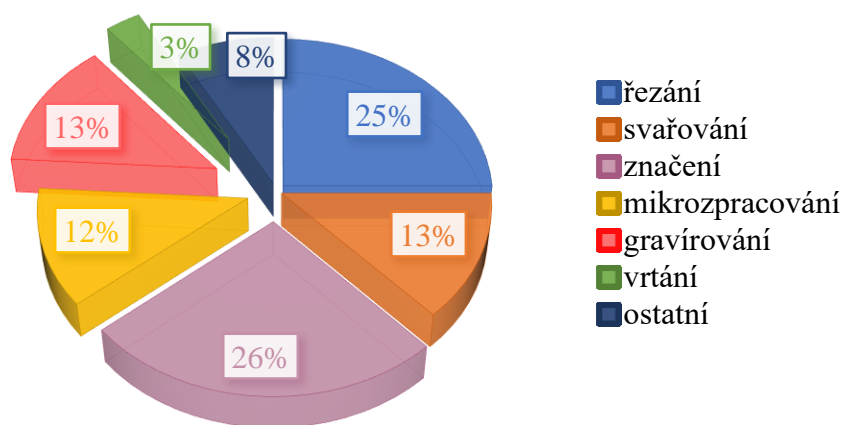
Obr. 8 Schéma polovodičového laseru [15]

2 LASEROVÁ TECHNOLOGIE [2], [3], [17]

Jak již bylo řečeno v úvodu, laserové technologie patří mezi nekonvenční metody obrábění. Během 70 let své existence prošla laserová technologie řadou inovací. Za tuto dobu našla využití v mnoha oborech, včetně průmyslu. V průmyslové sféře jde zejména o laserové opracování a obrábění materiálů bez jakéhokoliv mechanického kontaktu nástroje s materiálem. Všechny druhy laserových technologií vykazují především vysokou přesnost situování paprsku na velmi malou plochu, vyšší rychlost obrábění, nebo také komplexnost druhu obráběného materiálu. Zastoupení laserové technologie v průmyslu je znázorněno ve výsečovém grafu obr. 9.

Důležité parametry pro laserovou technologii jsou především:

- Výkon laseru – definován jako množství energie vyzářené za určitý čas.
- Výkonová hustota paprsku – také nazývána jako intenzita optického záření, je definována jako energie optického záření prostupující za jednotku času kolmo k určité ploše. Vhodnou úpravou paprsku lze dosáhnout vysoké hustoty energie a také vysoké teploty v místě dopadu v co nejkratším čase.



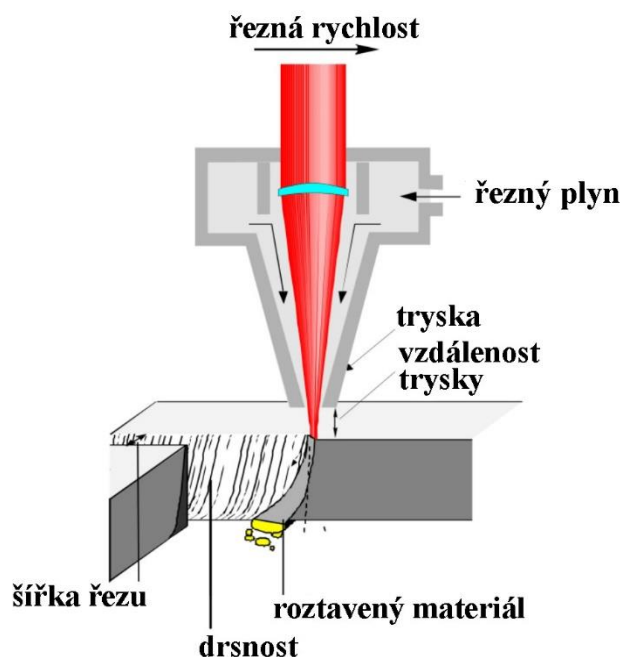
Obr. 9 Procentuální zastoupení jednotlivých laserových technologií v průmyslu [17]

2.1 Laserové řezání [2], [9], [18], [19]

Řezání laserovým paprskem patří k nejrozšířenějším, nejpoužívanějším a nejnovějším metodám dělení materiálu, jehož pomocí lze řezat kovové i nekovové materiály s různou tloušťkou a tvrdostí, protože při laserovém řezání záleží především na optických a tepelných vlastnostech materiálu. K nejpoužívanějším laserům patří jednoznačně kontinuální CO₂ laser, který byl také využit v experimentu. Díky střednímu výkonu, který dosahuje až 15 kW lze řezat různé druhy materiálů o různé tloušťce s velkou přesností a kvalitou. Pro přesnější řezy s menší řeznou spárou se využívají pevnolátkové lasery, především Nd:YAG laser.

Všechny části při průchodu paprsku či odrazu musí být dokonale čisté, jinak dojde ke zhoršení kvality paprsku. Paprsek je při výstupu z rezonátoru formován několika zrcadly, která musí být nejčastěji chlazena vodou. Během průchodu řezací hlavicí je paprsek fokusován na materiál čočkou, která je z obou stran opatřena antireflexní povrchovou vrstvou a zároveň slouží jako uzávěr přetlakového pásma řezného plynu. Po průchodu paprsku čočkou obaluje paprsek řezný plyn, který plní funkci ochranné atmosféry. Následně je usměrňován do místa řezu tryskou, jejíž průměr se volí dle druhu a tloušťky materiálu. Při kontaktu laserového paprsku s materiálem dojde k natavení materiálu a následuje odpaření či vyfouknutí asistenčním plynem. Celé schéma řezací hlavy a principu řezání je znázorněné na obr. 10.

Tuhnoucí kov na stěnách řezné spáry vykazuje značné vroubkování. Vznik a tvar vroubků má za následek převážně nerovnoměrné tuhnutí, povrchové napětí tekutého kovu, dynamická síla proudícího plynu, smykové tření mezi plynem a kovem nebo rychlost posuvu.



Obr. 10 Schéma principu laserového řezání [8]

2.1.1 Druhy metod podle řezného plynu [2], [9], [18], [19]

Při laserovém dělení materiálu je nutné používat řezné plyny, bez kterých by laserový paprsek neměl šanci materiál prořezat.

Podle druhu řezného plynu se laserové dělení materiálu rozděluje na:

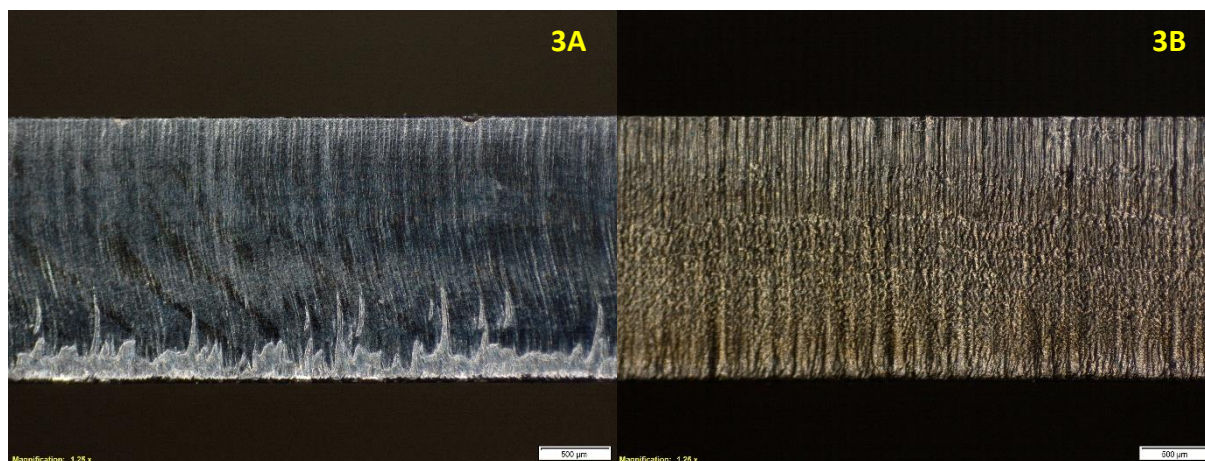
- Oxidační laserové řezání – oxidační způsob dělení materiálu využívá jako řezný plyn kyslík (O_2). Díky němu vznikne při interakci s materiálem plamen, který natavený materiál spálí a následným tlakem proudu plynu 0,5 – 5 bar je materiál vyfouknut ven z řezné spáry. Poloha ohniska, která je znázorněná na obr. 12 je situována na horní straně materiálu, a tím nedochází k podřezání a řezná spára je tak částečně kolmá. Při interakci plynu s nataveným materiálem vzniká také exotermická reakce, při které se uvolňuje energie ve formě tepla a dochází tak k lepšímu natavení materiálu. Rovněž má pozitivní vliv na řeznou rychlost v závislosti na tloušťce materiálu, která je daleko vyšší jak u tavného či sublimačního řezání. Řezné rychlosti pomáhá také vysoká čistota kyslíku, díky které lze rychlost zvýšit až o 20 %.

Oxidační řezání se využívá k řezání nelegovaných ocelí, které můžeme díky výkonu laseru 5 kW a velice kvalitnímu materiálu řezat do tloušťky až 30 mm.

- Tavné laserové řezání – dělený materiál je laserovým paprskem ohříván na teplotu tavení a následně je vyfouknut proudem řezného plynu ven z řezné spáry. K tomu se využívá inertní plyn, který nereaguje s taveninou. Nejběžnějším a také nejlevnějším inertním plynem je dusík (N_2), díky kterému se řez stává kovově lesklým a také zabraňuje vzniku oxidů na řezných hranách. I v tomto případě hraje čistota dusíku významnou roli. V porovnání s oxidační metodou je řezná spára jednoznačně širší, jelikož poloha ohniska je hluboce umístěna v materiálu, proto dochází také k podřezu (obr. 12). Dále je nutné snížit rychlost a několikanásobně zvýšit tlak přiváděného plynu (10 – 20 bar) tak, aby řez neobsahoval žádné otřepy.

Tavná metoda se využívá pro řezání vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů do tloušťky 25 mm. Tloušťka a kvalita řezu je ovlivněna jak výkonem laseru (cca 5 kW), tak i materiálovou charakteristikou. Proto při řezu materiálu s malou tepelnou vodivostí lze dosáhnout větších tloušťek než u materiálu s velkou tepelnou vodivostí. Díky cenové dostupnosti a spotřebě dusíku je tato metoda nákladnější.

Na obr. 11 jsou zobrazeny vyřezané vzorky materiálu DC01 tloušťky 2 mm oxidační a tavnou metodou, které byly následně využity k experimentu.



Obr. 11 Schéma řezných hran oxidační 3A a tavné 3B metody



Obr. 12 Srovnání ohniskové polohy pro oxidační (nalevo) a tavnou (napravo) metodu [18]

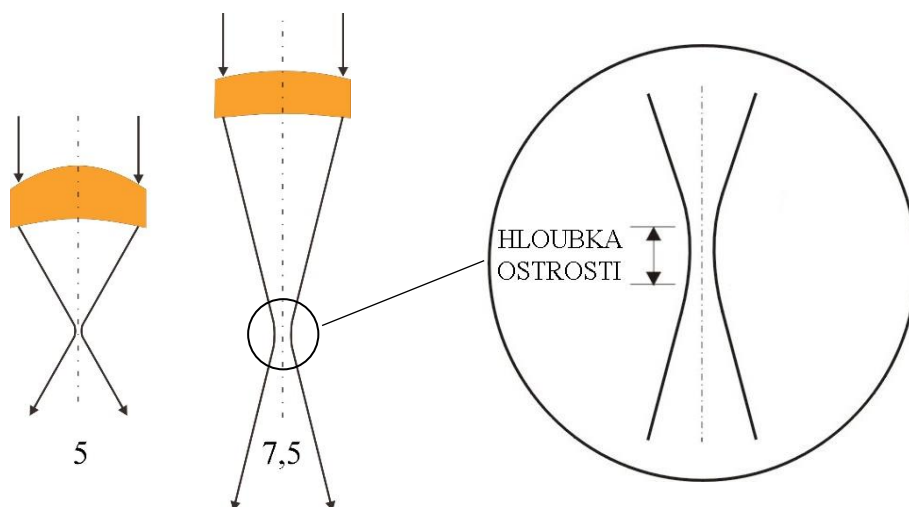
- Sublimační laserové řezání – tato metoda je charakteristická odpařováním materiálu z místa řezu, pokud možno bez jeho tavení. U sublimační metody jsou nutné vyšší výkony laseru a nižší řezné rychlosti než u metody tavné, neboť odpařování vyžaduje více energie. Aby při řezání nedocházelo k oxidaci materiálu, používají se jako řezné plyny dusík (N_2), argon (Ar) nebo helium (He), které patří do skupiny inertních plynů. Výsledkem je pak vysoce kvalitní a přesný řez. U volby materiálu pro sublimační metodu je nutné, aby materiály neměly teplotu tavení, nebo také, aby tloušťka řezaného materiálu nebyla větší než průměr paprsku, jelikož by mohly vzniknout svary v důsledku kondenzace par. Vhodným materiálem pro tuto metodu je tedy především dřevo, keramika nebo kompozit.

2.1.2 Řezné parametry [18], [20]

Existuje velké množství parametrů, které ovlivňují jakost řezné hrany. Tato podkapitola pojednává o nejdůležitějších z nich. K hodnocení jakosti řezu, pro materiály vhodné k řezání laserem, plazmou nebo plamenem, se využívá norma ČSN EN ISO 9013.

Mezi základní řezné parametry patří:

- Výkon laseru – je jedním z významných a také základních laserových parametrů. Je potřeba ho nastavit tak, aby došlo k úplnému prořezu paprsku materiálem při určité kvalitě řezu, jelikož při špatné volbě parametru může dojít k zhrubnutí řezu. Rozdíl ve výkonu mezi oxidační nebo tavnou metodou je poměrně zásadní. U oxidační metody je samotný výkon až trojnásobně nižší. Výkon může být nižší díky exotermické reakci, která materiál v plynném kyslíku lépe nataví a spálí.
- Tlak a typ řezného plynu – další velice významný parametr, který ovlivňuje kvalitu řezu a také ekonomiku výroby. Ve stroji nebo řezacím listu se značí chemickou značkou nebo číslem. Záleží na výrobci stroje, kterou variantu označení zvolí.
- Řezná rychlost – parametr závislý na tloušťce materiálu, jehož úpravou dochází ke změnám jakosti řezu (viz obr. 15).
- Kolmost a poloha ohniska paprsku – laserové řezání má oproti jiným metodám dělení materiálu tu výhodu, že dochází téměř k minimálnímu podřezání a tím se řez stává kolmým. Důležitý je i správný výběr čočky, která z intenzity laserového paprsku vytvoří Gaussovu křivku. Tato křivka má charakter ohniska ve tvaru „válcové“ plochy, která zcela nahrazuje ohniskový bod. Je nutné situovat plochu „válce“ dovnitř materiálu, aby řez měl určitou kolmost, správným nastavením jeho polohy se zamezí degradaci čočky. Tato podmínka byla již zmíněná u oxidační a tavné metody a taktéž je znázorněna na obr. 12. Délka „válcové“ plochy se nazývá hloubka ostrosti, která se mění správným výběrem čočky při určité tloušťce materiálu. Pro CO₂ dělení se využívají nejčastěji tyto dva typy čoček s různými optickými parametry - 5 in nebo 7,5 in. Oba typy jsou znázorněny na obr. 13. Jeli povrch čočky znečištěný, dochází k její degradaci, vlivem nedostatečného chlazení a také dojde ke změně ohniskové vzdálenosti.



Obr. 13 Schéma laserového paprsku [18]

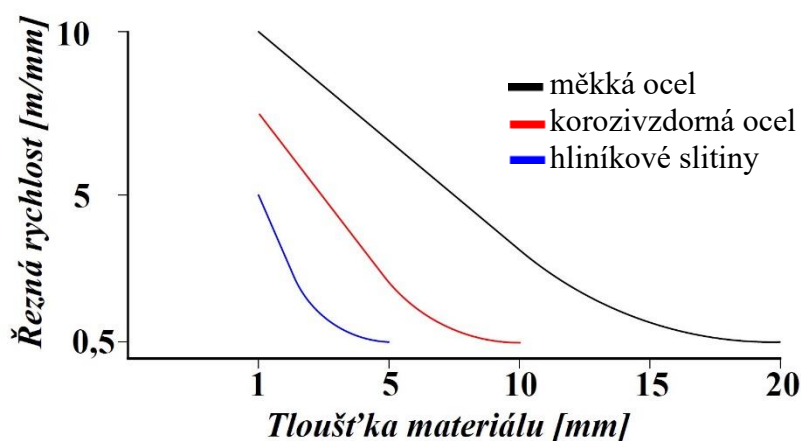
- Vzdálenost mezi tryskou a materiálem – jedná se o vzdálenost mezi spodní rovinou trysky a materiálem, která se udržuje pomocí kapacitního snímače vzdálenosti. Regulací této vzdálenosti dochází ke změně polohy ohniska a také ke změně objemu plynu vstupujícího do místa řezu. Čím menší je tato vzdálenost, tím větší bude tlak plynu a tím i naroste pravděpodobnost znehodnocení čočky nebo samotné trysky. Dalším důležitým parametrem je správný výběr trysky kruhového průřezu různých velikostí, která je upevněná v keramickém kroužku řezné hlavy. Jeli její průřez poškozen, dochází ke zhoršení kvality laserového řezání. Povrch trysky a jeho

geometrie je speciálně vytvořena tak, aby minimalizovala přichytávání vystřikovaného roztaveného kovu. Schéma trysky je zobrazeno na obr. 14.



Obr. 14 Schéma trysky [20]

- Režim řezu – existují dva typy režimu laserového řezání – pulzní (pw) a kontinuální (cw).
- Zapichování (startovací otvor) – před samotným začátkem řezání je nutné se propálit skrz materiál. Tomuto procesu se říká zapichování, které probíhá kontinuálním nebo pulzním režimem. Kontinuální režim je oproti pulznímu daleko rychlejší a zároveň vytvoří velký startovací otvor. Pulzní zápich je podstatně jemnější, dá se umístit do kontury řezu součásti, ale celý proces zapichování trvá mnohem déle.



Obr. 15 Grafické znázornění řezné rychlosti závislé na tloušťce materiálu [18]

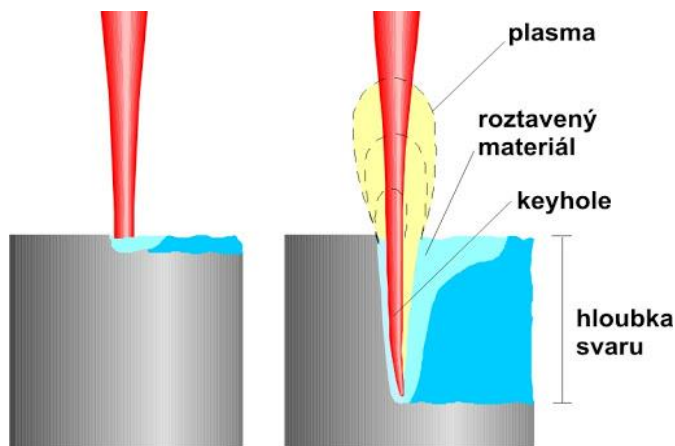
2.2 Laserové svařování [8], [9], [17], [19], [21], [22]

Svařování laserovým paprskem je jedna z nejuniverzálnějších metod dnešního svařování, které probíhá převážně bez přídavného materiálu. Stejně jako při řezání je paprsek zaostřen do ohniska, kde dochází k rychlému lokálnímu ohřevu vlivem koncentrace energie, a vzniká tak natavení materiálu. Pro tuto technologii se používají převážně pevnolátkové Nd: YAG lasery a plynné CO₂ lasery. Častěji využívané jsou pevnolátkové lasery, které pracují při větší vlnové délce. Díky ní dochází k lepší absorpci (pohlcení) záření materiálem. Na rozdíl od řezání, svařování obecně nevyužívá tak vysoké výkony.

Za největší výhodu laserového svařování lze považovat rozmanitost svařovaných materiálů. Díky laserovému paprsku můžeme svařovat hůře svařitelné nebo dva odlišné materiály, které převážně nepodléhají korozi. Mezi ty hůře svařitelné patří například hliník (Al), který má vyšší tepelnou vodivost nebo titan (Ti), který se vyznačuje vysokou teplotou tavení. Mezi další výhody patří vysoká kvalita a přesnost svaru, takže bez nároku na další opracování, dále pak vysoká rychlost svařování nebo vysoká pevnost. K tomu, aby bylo dosaženo těchto výhod, je nutné využít CNC řízené laserové svařování.

Laserové svařování se dělí na dvě metody (obr. 16):

- Metoda kontaktního svařování – u této metody dochází k natavení na povrchu materiálu, kde průvar dosahuje pouze desetin milimetru.
- Metoda hlubokého svařování (metoda keyhole) – spočívá v působení paprsku na materiál o velmi vysoké výkonové hustotě paprsku, který způsobí vytlačování nataveného materiálu působícím odpařováním. Vzniká „klíčová dírka“ (kapilára), která se postupně zaceluje právě nataveným materiálem na stěnách vlivem posuvu laserového paprsku a následným působením povrchového napětí. Vzniká tak úzký a hluboký svar.



Obr. 16 Schéma metod kontaktního (nalevo) a hlubokého (napravo) svařování [8]

2.3 Laserové vrtání [17], [19], [23]

Tak, jako u ostatních laserových technologií, laserové vrtání patří k těm nejpřesnějším, ale také nejstarším. Princip vzniku díry laserovým paprskem by se dal přirovnat k hlubokému svařování, s tím rozdílem, že paprsek zůstává ve stacionární poloze. Vlivem vysoké výkonové hustotě paprsku působícího na materiál, dochází k vytlačování nataveného materiálu odpařováním směrem ven.

Laserový paprsek se využívá z velké části pro zhotovení až tisíců milimetrových, ale také hlubokých děr v materiálu, kterých nelze dosáhnout pouhým nástrojem. K vytvoření tak malých děr se využívají převážně, díky své vlnové délce, Nd: YAG lasery. Další výhodou je různorodost vrtaných materiálů jako jsou např. kompozity, hůře obrobitelné kovy, keramiky nebo polymery.

2.4 Laserové opracování povrchu [3], [9], [17], [24], [25], [26]

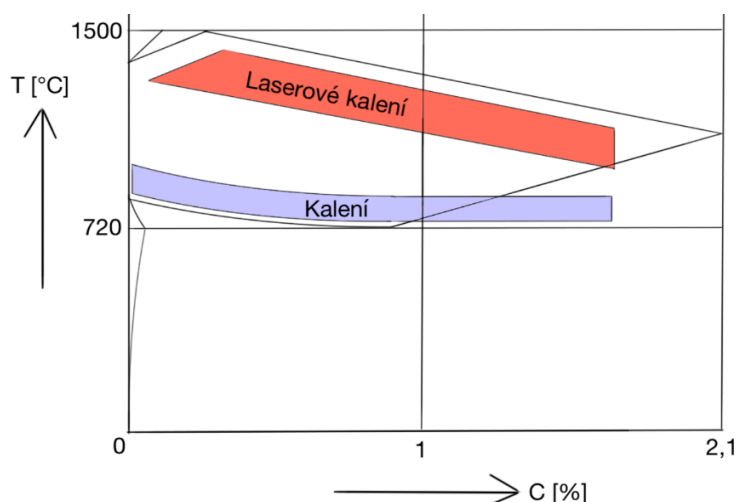
Výhodou laserového paprsku je především jeho komplexnost, která umožní materiál rozdělit, spojit, vyvrtat, nebo také upravit vlastnosti daného povrchu materiálu.

Další často používané laserové technologie jsou ty, které dokáží opracovat povrch materiálu. Jelikož se jedná o bezkontaktní obrábění, je možné opracovat rovinné nebo zakřivené povrchy. Tím se zvýší odolnost proti opotřebení nebo korozi. Dále lze laserové opracování povrchu využít k mechanicky odolnému značení.

- Laserové povlakování – princip laserového povlakování spočívá v nanesení vrstvy materiálu na povrch základního materiálu. Nanesený materiál je přiváděn dvěma různými způsoby – přímo do laserového paprsku v podobě prášku nebo drátu, kde energie paprsku vytvoří tenkou vrstvu na základním materiálu, nebo nanesením materiálu na povrch základního materiálu, kde je následně laserovým paprskem roztaven. Vznikají tak pásy dvou materiálů (základní a nanesený), které se navzájem překrývají, a také jsou minimálně promíchány z důvodu toho, že základní materiál nebyl

laserovým paprskem takřka vůbec teplotně ovlivněn. Získáme tak tvrdou a pevnou strukturu bez jakékoliv trhliny, která slouží ke zvýšení korozní, a především mechanické odolnosti povrchu součásti. Tloušťka nanesené vrstvy může dosahovat až 1 mm. K laserovému povlakování se nejčastěji používají plynné CO₂ lasery.

- Laserové značení a gravírování – jsou to technologie, které patří k nejrozšířenějším laserovým průmyslovým aplikacím na světě s velkou budoucností. Účel obou popisovacích metod je stejný, tedy tepelným působením laserového paprsku popsat povrch součásti tak, aby byla zaručena nesmazatelnost a též viditelnost dané plochy. Rozdíl v principu spočívá v působení laserového paprsku. Během laserového značení dochází k ohřevu daného místa povrchu, který následně ztmavne. Při gravírování dochází k úběru vrstvy povrchu materiálu kombinací tavení a odpařování. Vzniká tak trojrozměrná prohlubeň (gravura) hluboká maximálně 50 μm. Značit či řezat současně dokáží v dnešní době bezmála všechna výkonná laserová zařízení. Obrábět lze všechny druhy materiálů, různých tvarů a velikostí, včetně těch, u kterých byla provedena povrchová úprava. Uplatnění naleznou díky své komplexnosti ve všech sférách průmyslu.
- Laserové kalení – v dnešní technologii tepelného zpracování se jedná o nejmodernější a nejrychlejší metodu. Při klasickém kalení dochází k ohřátí materiálu do oblasti kalících teplot (viz obr. 17), kde je následně materiál prudce ochlazen kapalinou (voda, olej). Vlivem rychlosti ochlazení vznikají vnitřní pnutí, která mohou zapříčinit vznik trhlin. Aby se odstranilo vzniklé pnutí, je potřeba materiál popouštět. Narozdíl od klasického kalení se u toho laserového pouze zakalí povrchová vrstva materiálu, kdy struktura a vlastnosti jádra zůstávají neměnné a houževnaté. Princip spočívá v dodání vysoké energie rozostřeného paprsku materiálu, který se rychle ohřeje na danou teplotu. Plynulým posuvem laserového paprsku se natavené části rychle ochladí okolním materiálem bez jakéhokoliv chladicího média. Finální struktura je pak jemná, tvrdá a pevná bez vnitřního pnutí. Svoji tloušťkou prokalení může dosáhnout až 2 mm. Nejčastějšími kalenými materiály jsou především uhlíkové oceli, nebo také legované oceli s příměsí chromu (Cr), molybdenu (Mo), manganu (Mn) nebo vanadu (V).



Obr. 17 Schéma kalících teplot pro klasické a laserové kalení v Fe3C diagramu [24]

3 POVRCHOVÁ DRSNOST [27], [28], [29]

Ve strojírenské technologii platí, čím lepší kvalita povrchu, tím je nižší problematika. Povrchová drsnost výrazně ovlivňuje životnost a spolehlivost součástí. Zároveň má za následek odolnost proti opotřebení a korozi, únavovou pevnost, ztráty třením, nebo také chod strojních součástí.

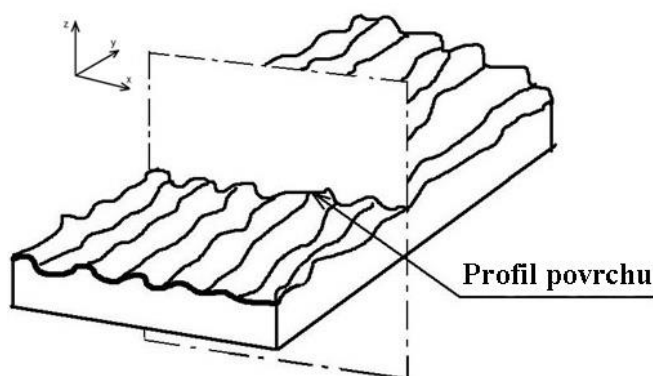
Povrchová drsnost spadá pod obecný pojem struktury povrchu. Tou se rozumí opakované nebo náhodné úchyly od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu. Tyto úchyly vznikají při výrobě nebo obrábění materiálu a jsou odlišné v závislosti na užití výrobní technologii. Kromě drsnosti povrchu je dalším hlavním prvkem struktury vlnitost povrchu.

Při použití laserové technologie je vzniklá drsnost zapříčiněná průnikem laserového paprsku do materiálu rovnoběžně s osou paprsku. Na jakost geometrie povrchu řezné hrany má vliv rychlost paprsku, tlak působící na daný materiál, tloušťka daného materiálu a především čistota řezného plynu. Doposud nebyly zavedeny, ani sestaveny normy pro zhodnocení struktur povrchů vzniklé laserovým řezáním. Nejčastěji užívané normy k zhodnocení jsou normy všeobecné jako např. ČSN EN ISO 4287. Tato norma byla použita i v této práci.

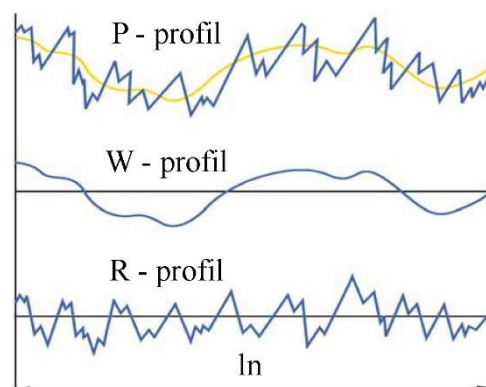
3.1 Měření struktury povrchu [27], [28], [29], [30]

Měření struktury povrchu probíhá v rovině kolmé k povrchu materiálu (viz obr. 18). Je naměřena profilová křivka, na které se vyhodnocují parametry struktury povrchu. Profilovou křivku tvoří základní profil P, ze kterého se po použití filtru λ_c získá profil drsnosti R a profil vlnitosti W (viz obr. 19). Filtrem na základním profilu se odliší krátkovlnné a dlouhovlnné složky a rozdělí se právě do těchto dvou profilů (jejich opětovným složením bychom dostali znovu primární profil).

Lze vyhodnotit parametry profilů P, R, a W, avšak v praxi se nejčastěji vyhodnocují parametry profilu drsnosti R.



Obr. 18 Profil povrchu [27]



Obr. 19 Struktura povrchu [28]

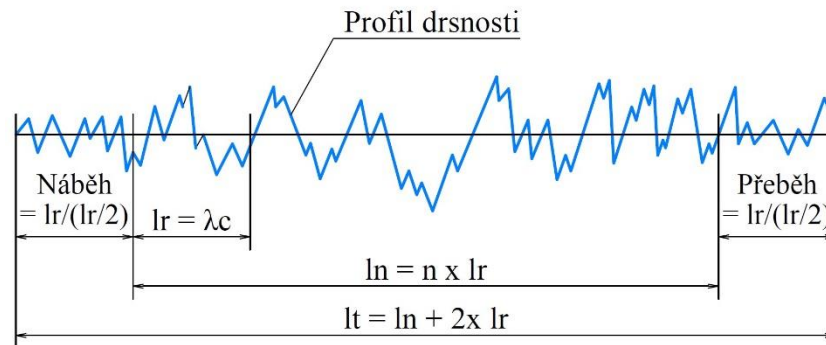
3.1.1 Definice parametrů drsnosti [27], [30]

Při měření drsnosti se získá profil, který se přibližuje k profilu skutečnému, jedná se o profil přibližný. K vyhodnocení daného povrchu je nutné stanovit dostatečně velké délky měření k tomu, aby byla zaručena co nejkvalitněji vyhodnocená jakost povrchu. Celé schéma profilu drsnosti s délkami je zobrazeno na obr. 20.

K vyhodnocení daného povrchu se využívají tyto délky:

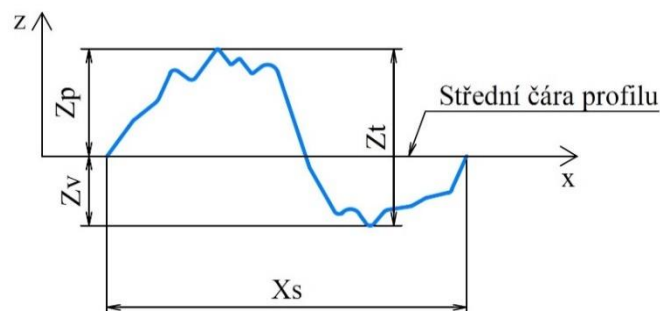
- Délka náběhu a přeběhu – tyto délky jsou zahrnuty při měření jakosti povrchu, přičemž pro vyhodnocení drsnosti jsou nepodstatné.

- Základní délka (l_r) – využívá se pro rozpoznání nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil drsnosti ve směru osy x.
- Vyhodnocovaná délka (l_n) – délka ve směru osy x, která se využívá k posouzení vyhodnocovaného profilu. Z této délky se vyhodnocují požadované parametry. Její velikost se rovná n počtu (nejčastěji 5) základních délek.
- Celková délka (l_t) – složená ze všech základních délek měřeného povrchu ve směru osy x.



Obr. 20 Profil drsnosti [30]

- Prvek profilu – je vyznačen největším výstupkem a prohlubní (překračující střední čáru profilu) viz obr. 21. Na tomto prvku je možné určit následující parametry, ze kterých jsou pak vypočteny parametry drsnosti na vyhodnocované délce profilu.
 - Výška výstupku profilu (Z_p) – vzdálenost nejvyššího bodu výstupku od střední čáry profilu.
 - Hloubka prohlubně profilu (Z_v) – vzdálenost nejnižšího bodu prohlubně od střední čáry profilu.
 - Výška prvku profilu (Z_t) – součet výšky výstupky a hloubky prohlubně.
 - Šířka prvku profilu (X_s) – vzdálenost na ose x, kde čára profilu protíná střední čáru profilu (vylučující protnutí při přechodu z výstupku na prohlubeň).



Obr. 21 Prvek profilu [30]

Drsnost povrchu lze popsat širokým množstvím parametrů, které se dělí na parametry:

- Výškové
 - Největší výška výstupního profilu (R_p) – parametr roven maximální výšce Z_p výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r .

$$R_p = \max(Z_{p_i}) [\mu m] \quad (3.1)$$

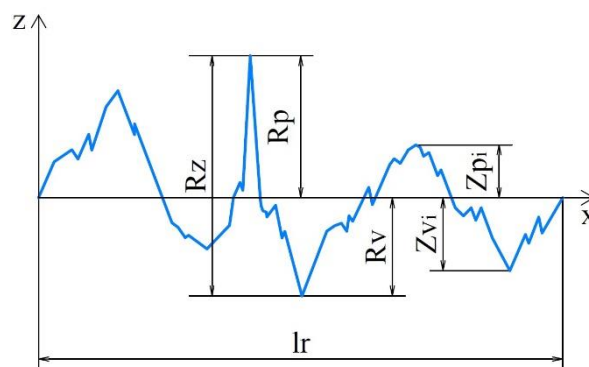
- Průměrná výška prvků profilu (R_c) – průměrná hodnota výšek Z_t prvků drsnosti v rozsahu základní délky l_r .

- Největší hloubka prohlubně profilu (R_v) – parametr roven maximální nejnižší hloubce Z_v profilu drsnosti v rozsahu základní délky l_r .

$$R_v = \max(|Z_{v_i}|) [\mu m] \quad (3.2)$$

- Největší výška profilu (R_z) – získána součtem výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu R_p a hloubky Z_v s nejnižší prohlubní profilu R_v (viz obr. 22.).

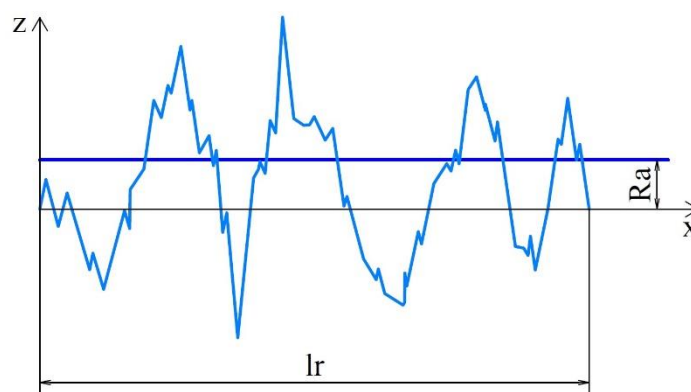
$$R_z = R_p + R_v [\mu m] \quad (3.3)$$



Obr. 22 Největší výška profilu (R_z) [30]

- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (R_a) – jedná se o nejvyužívanější parametr ke stanovení drsnosti povrchu ve strojním průmyslu. K jeho dosažení je nutné udělat aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ po integrační cestě v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 23). Je nutné si ujasnit, že ze samotného parametru R_a nelze zjistit, jak vlastně daný profil vypadá.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (3.4)$$

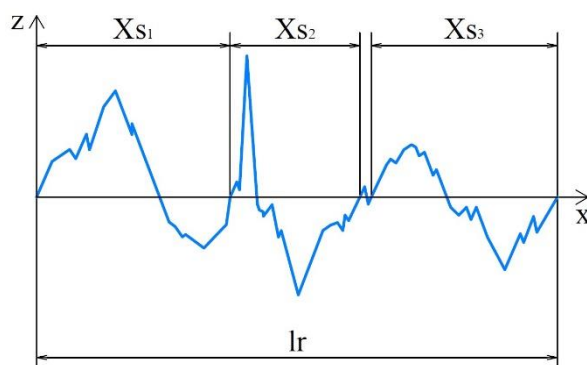


Obr. 23 Průměrná aritmetická úchylka (R_a) [30]

- Celková výška profilu (R_t) – získána součtem výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.
- Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu (R_q) - jedná se o směrodatnou odchylku (kvadratický průměr) pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r .

- Šikmost posuzovaného profilu (R_{sk}) – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r .
- Špičatost posuzovaného profilu (R_{ku}) – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r .
- Délkové
 - Průměrná šířka prvků profilu (R_{Sm}) – základní charakteristika drsnosti v podélném směru. Tento parametr je definován jako aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 24).

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_{s_i} [\mu m] \quad (3.5)$$



Obr. 24 Průměrná šířka prvků profilu (R_{Sm}) [30]

3.1.2 Metody měření drsnosti povrchu [30], [31]

K zjištění parametrů drsnosti povrchu existuje široké škála metod měření založených na různých principech.

Tyto metody se dělí na:

- Kvalitativní – jedná se o zastaralou a velice nepřesnou metodu založenou na základě zkoumání drsnosti povrchu porovnáním se vzorkovnicí.
- Kvantitativní – v dnešní době nejčastěji užívaná metoda, která je založena na matematickém popisu parametrů povrchu, pro jejichž zjištění se využívají tzv. profilometry (drsnoměry), s kterými lze naměřit i vlnitost nebo tvar daného profilu.

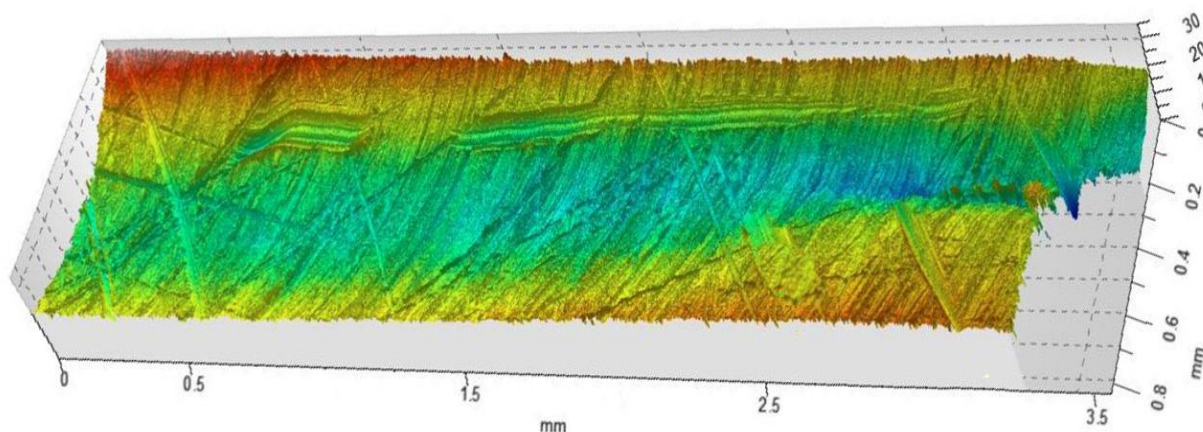
Tyto měřicí přístroje se dále dělí na:

- Kontaktní – jedná se o profilometr, který patří k nerozšířenějším přístrojům používaným k měření drsnosti povrchu. Princip měření spočívá v posuvu ramene upevněného v profilometru se snímacím hrotem po povrchu měřené součásti. Tento hrot bývá nejčastěji diamantový a to z toho důvodu, aby byla co nejlépe zachována jeho geometrie v rámci odolnosti proti otěru. Výsledkem měření jsou pak velice přesné hodnoty, které ovlivňují především poloměr zaoblení a vrcholový úhel snímacího hrotu nebo velikost přitlačné síly. Za největší výhodu lze považovat jeho komplexnost v rámci měřeného povrchu. Při tomto typu měření nezáleží tak mnoho na čistotě povrchu, např. olejová vrstva nebo malé nečistoty. Celé schéma principu daného profilometru je zobrazeno na obr. 25.
- Bezkontaktní – princip spočívá v použití bílého světla, jehož paprsek je regulován optikou na zkoumaný povrch, ze kterého se následně odrazí. Část zaostřeného vlnové délky světla prochází otvorem zpět do přístroje, ve kterém se následně pomocí spektrometru a dalších zařízení vyhodnotí struktura

povrchu. Je nutné, aby byla zaručena co nejdokonalější čistota měřeného povrchu, neboť různé nečistoty mohou znehodnotit měření. Bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu se nejčastěji využívá k laboratorním nebo vědeckým účelům. Schéma 3D profilu vytvořené bezkontaktním profilometrem je znázorněn na obr. 26.



Obr. 25 Schéma kontaktního profilometru [30]



Obr. 26 3D struktura povrchu vytvořena bezkontaktním profilometrem [30]

3.2 Norma ČSN ISO 9013 [23], [32]

Jedná se o mezinárodní typ normy, která se využívá pro materiály vhodné ke kyslíkovému, plazmovému nebo laserovému řezání. Platí pro řezy normou daných materiálů, při řezání plamenem od 3 mm do 300 mm, řezání plazmou od 0,5 mm do 150 mm a laserovým řezáním od 0,5 do 40 mm. Norma zahrnuje, dle metod řezání, klasifikace tepelného dělení, geometrické požadavky na výrobky, úchytky jakosti povrchu řezu nebo technickou dokumentaci.

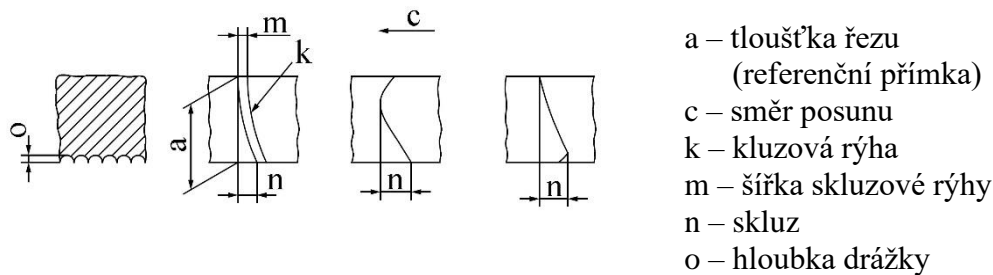
Měření se předepisuje na místech bez vad a taktéž předem kartáčem očištěných místech řezu k zredukování výskytu oxidů. Je nutné, aby měření bylo prováděno tam, kde je možno očekávat maximální naměřené hodnoty. Počet a umístění těchto míst závisí na tvaru a velikosti zpracovávaného kusu, které stanoví sám výrobce. Zda-li nejsou podmínky splněny, pak je nutné provést další operace, které jsou podrobněji vyjádřeny přímo v normě.

Při měření drsnosti povrchů ve směru posuvu hořáku s použitím měřidel dle ISO 3274 se vyhodnocuje průměrná výška prvků profilu $Rz5$, která vznikla z aritmetického průměru součtu výšek profilu Z_t na pěti za sebou následujících základních délkách l_r , nebo také ve zjednodušení, $Rz5$ není nic jiného než průměrná hodnota největší výšky profilu

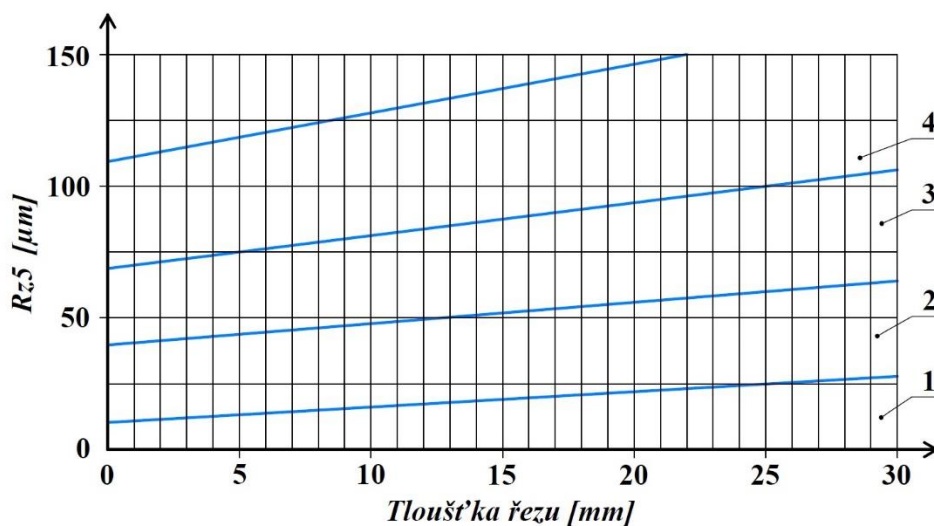
Rz. Naměřené hodnoty se dále vynesou do grafu Rz5 v závislosti na tloušťce materiálu, který je rozřazen do čtyř tříd. Na obr. 28 je znázorněný právě jeden ze dvou grafů, které norma udává. Rozdíly mezi oběma grafy jsou pouze v intervalu hodnot na osách. Tento graf byl následně využit v experimentu k rozřazení naměřených Rz do tříd.

Dále norma udává:

- šířka řezné spáry – jedná se o vzdálenost mezi povrchy řezu závislé na průměru paprsku.
- skluz – dle normy je definován jako vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání (viz obr. 27).



Obr. 27 Skluzová rýha [32]



Obr. 28 Graf Rz5 v závislosti na tloušťce materiálu dle normy ČSN ISO 9013 [32]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již z názvu plyne, cílem této bakalářské práce bylo vyřezat plynovým CO₂ laserem a následně změřit a vyhodnotit drsnosti řezných hran materiálu DC01 dle normy ČSN EN ISO 9013.

4.1 Použitý materiál [33], [34]

K experimentu byl použit materiál DC01 (Cold Rolled Coil), který je označen dle jakosti normou ČSN EN 10130 jako ocel 11 321. Jedná se o nízkouhlíkovou nelegovanou ocel válcovanou za studena, jejíž polotovár je nejčastěji dodáván ve formě tabulí nebo svitků plechu, povrchově naolejovaných za účelem konzervace materiálu. Jedná se o neuklidněnou ocel s obsahem uhlíku menším než 0,3 %, proto je nutné, aby byla v co nejkratším čase zpracována, jelikož při delším skladování může nastat nežádoucí stárnutí.

Tato ocel je vhodná ke tváření za studena, povrchovým úpravám nebo různým typům svařování. Přehled materiálových charakteristik je uveden v tab. 2.

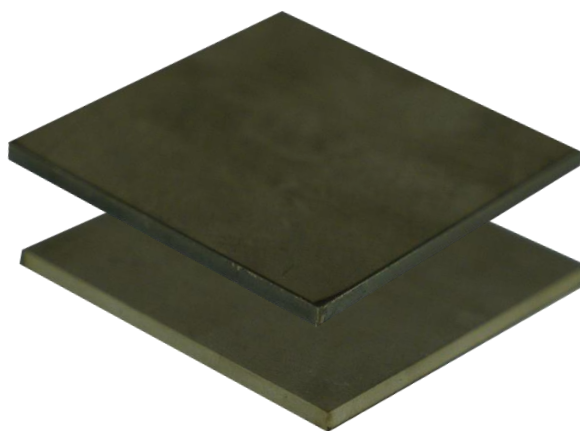
Tab. 2 Základní vlastnosti oceli 11 321 [33], [34]

Materiál	Ocel 11 321			
Mechanické vlastnosti	Mez kluzu R _e [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A [%]	
	240	270 - 410	28	
Chemické složení	Uhlík C [%]	Mangan Mn [%]	Fosfor P [%]	Síra S [%]
	max 0,12	max 0,6	max 0,045	max 0,045

4.2 Laserové dělení materiálu [35]

První část experimentu probíhala ve firmě LASERCORE s.r.o. sídlící ve Vyškově. Po výběru materiálu DC01 tloušťky 2 a 3 mm, které firma pro experiment poskytla, bylo cílem vyřezat vzorky ve tvaru čtverce 50 x 50 mm oxidační a tavnou metodou. Po vyladění řezných parametrů, jako jsou například výměna trysky s průměrem 0,8 mm pro oxidační a 1,4 mm pro tavnou metodu, výměna řezné hlavy s čoučkou 5 in, nebo také změna ohniskové vzdálenosti, rychlosti apod. následoval řez.

Aby experiment měl při následném měření drsnosti hran smysl, byl stanoven počet vzorků 10 ks na danou tloušťku plechu pro danou metodu řezného plynu, přičemž k následnému měření se vzal vždy první a poslední kus. Prvotní kusy bývají zpravidla vždy nedokonalé v porovnání s posledním kusem. To je způsobeno přítomností nečistot v trysce nebo v počátečním proudu plynu. V tab. 3 jsou znázorněny základní parametry laserového řezání, které jsou vyňaty přímo z laseru včetně času řezání. V tomto čase není zahrnutý proplach řezné hlavy s tryskou plynem před počátečním řezáním a zapichováním. Celková tabulka s kompletními řeznými parametry je zobrazena v příloze 1.



Obr. 29 Schéma vyřezaných zkušebních vzorků

V teoretické části na obr. 11 a v experimentální části obr. 30 jsou znázorněny mikroskopicky zvětšené řezy vzorků pořízené oxidační a tavnou metodou, které poukazují na rozdíly mezi použitými řeznými metodami.



Obr. 30 Řezné hrany oxidační (nalevo) a tavné (napravo) metody tloušťky 3 mm

Pro laserové dělení byl použit automatizovaný portálový plyný CO₂ laser s výměnnými stoly 3000 x 1500 mm s označením TrueLaser 3030 s maximálním výkonem 4kW, jehož výrobce je Německá firma TRUMPF. Tento typ laserového zařízení je znázorněn na obr. 31.



Obr. 31 Plyný CO₂ laser TRUMPF TrueLaser 3030 [35]

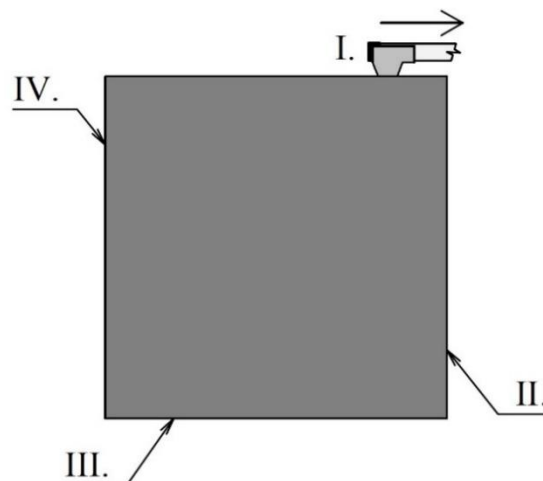
Tab. 3 Základní řezné parametry

	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
Tloušťka materiálu [mm]	2	2	3	3
OBECE				
Ø trysky [mm]	0,8	1,4	0,8	1,4
Ohnisková vzdálenost [in]	5	5	5	5
Rychlost upravená potenciometrem [%]	95	95	95	95
Tlak plynu upravený potenciometrem [bar]	2,5	16	0,7	15,8
ŘEZÁNÍ - VELKÝ OBRYŠ				
Hodnota nastavení FocusLine [mm]	0	-2	0,5	-1,7
Výkon laseru [W]	850	3600	1500	3750
Rychlost [m/min]	4	5	3,6	3,4
Vzdálenost trysky [mm]	0,7	0,7	0,8	0,7
Tlak plynu [bar]	2,5	16,0	0,9	16,0
Čas [s]	47,55	43,89	57,54	57,91

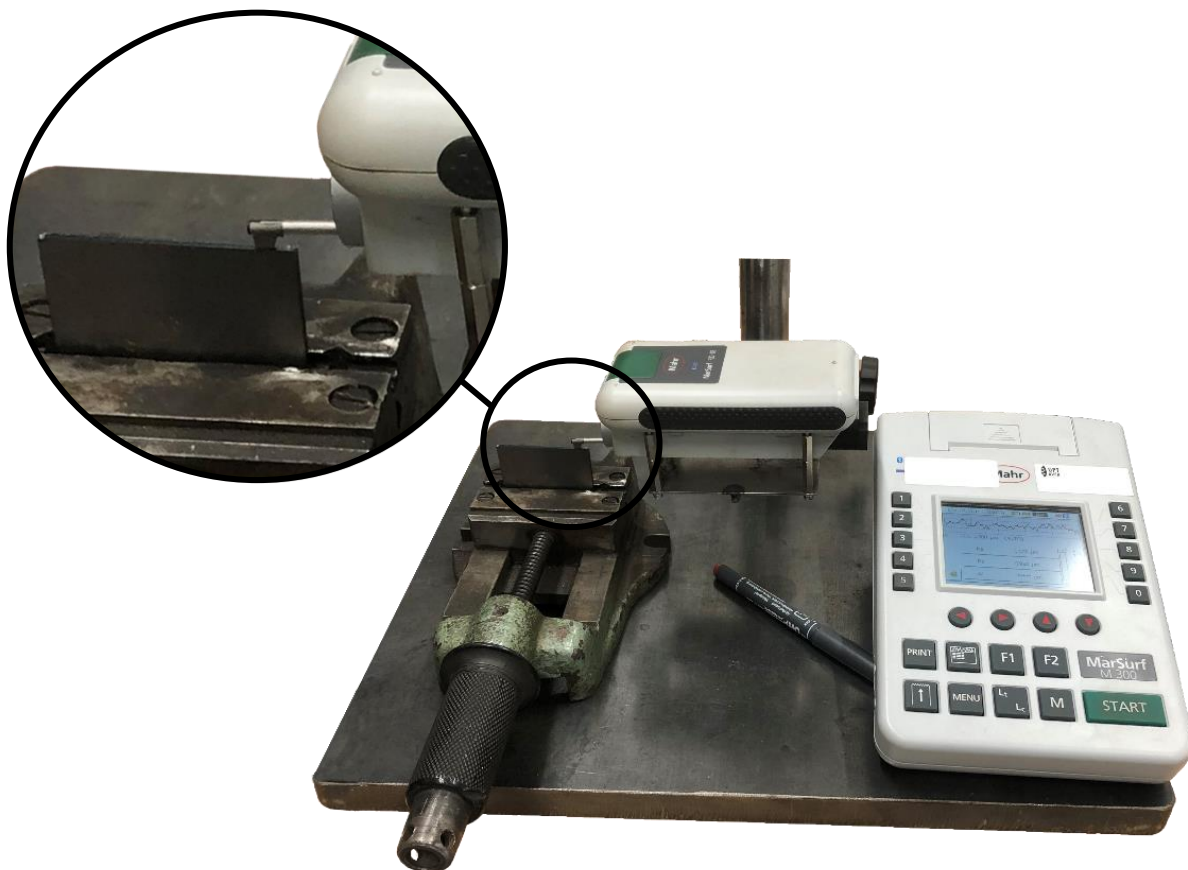
4.3 Měření drsnosti řezných hran [32]

Po vyřezání vzorků následovalo měření drsnosti řezných hran, které probíhalo na půdě Akademie věd České republiky Ústavu přístrojové techniky. Cílem této části bylo změřit a zaznamenat střední aritmetickou úchylku profilu (R_a) a největší výšku profilu (R_z). K měření se použilo zařízení MarSurf M 300 s bezdrátovým snímačem MarSurf RD 18, který funguje na základě posuvu ramene (PHT - 6) s diamantovým snímacím hrotem na konci po ploše měřeného povrchu.

Před měřením bylo nutné přístroj spojit se snímací jednotkou, dále ho zkalibrovat a nastavit základní délku $l_n = 0,25$ mm. Celý proces probíhal přesně tak, jak je znázorněno na obr. 33, tedy vzorek byl upnut do svěráku a diamantovým snímačem zhruba centimetr od rohu hrany bylo provedeno měření. K měření se vzalo celkem osm vzorků, tedy první (1. vz.) a poslední desátý vzorek (2. vz.) pro danou tloušťku plechu a daném řezném plynu. Každý vzorek byl změřen celkem 4x, neboli z každé strany hrany řezu (viz obr. 32), abychom dostali optimální parametry k zhodnocení. Celkové naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 32 Schéma postupu měření



Obr. 33 Schéma přístroje MarSurf při měření vzorku

Po naměření jednotlivých vzorků a stanovení Ra a Rz se následně spočítaly aritmetické průměry jednotlivých parametrů, a také jejich směrodatné odchylky. Tyto výpočty jsou znázorněny v tab. 4, a také v příloze 2.

Pro výpočty byly použity tyto vzorce:

- Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

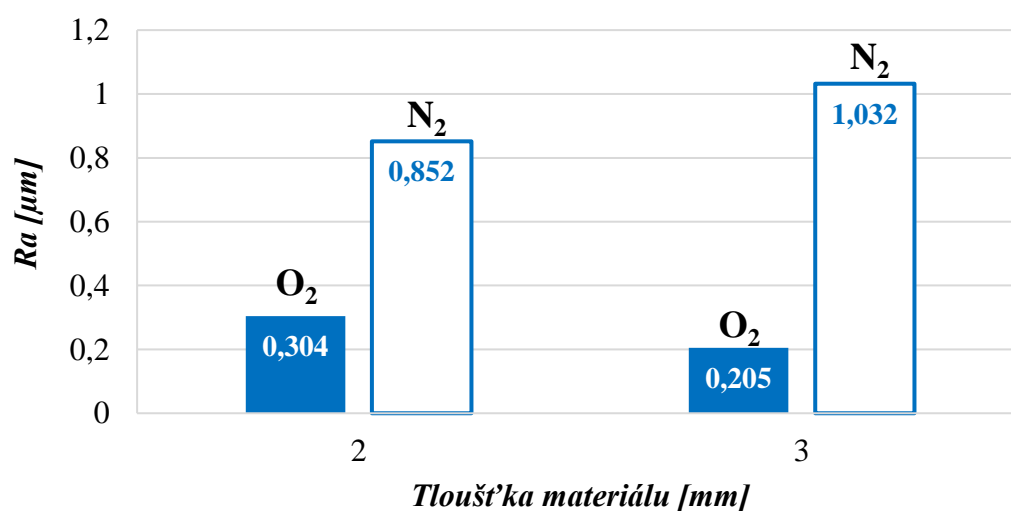
- Směrodatná odchylka:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

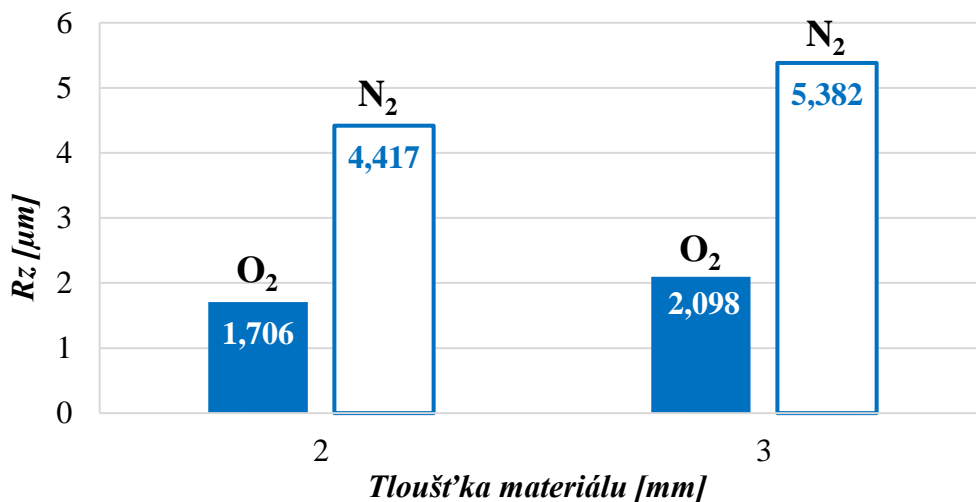
Pro zestručnění jednotlivých hodnot byly parametry vzorku 1 a 2 zprůměrovány v jednu hodnotu viz. tab. 4. Tyto hodnoty byly dále vyneseny do dvou sloupcových grafů (obr. 34 a obr. 35) $Ra = f(tl.)$ a $Rz = f(tl.)$, které znázorňují oba parametry v závislosti na tloušťce plechu v porovnání s řezným plynem.

Tab. 4 Naměřené parametry drsnosti

Tloušťka materiálu [mm]	Řezný plyn	Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
2	O ₂	Ra	0,304	0,064
		Rz	1,706	0,541
	N ₂	Ra	0,852	0,065
		Rz	4,417	0,465
3	O ₂	Ra	0,205	0,03
		Rz	2,098	0,152
	N ₂	Rz	1,032	0,1535
		Rz	5,382	0,527

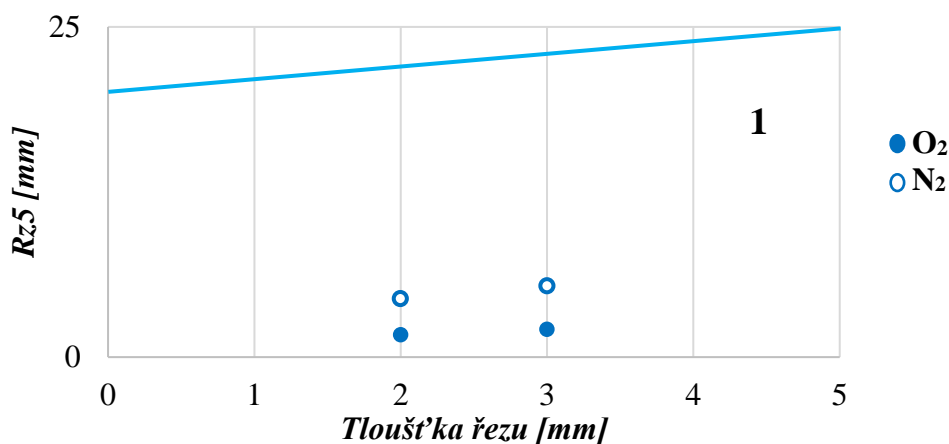


Obr. 34 Graf Ra v závislosti na tloušťce materiálu při použití daného řezného plynu



Obr. 35 Graf Rz v závislosti na tloušťce materiálu při použití daného řezného plynu

Dle normy ČSN EN ISO 9013, která udává graf průměrné výšky prvků profilu Rz5 v závislosti na tloušťce děleného materiálu, v tomto případě tloušťka laserově děleného materiálu, byly vyneseny hodnoty největší výšky profilu Rz a následně rozřazen do tříd (viz obr. 36).



Obr. 36 Vynesené naměřené hodnoty do grafu dle normy ČSN EN ISO 9013 [32]

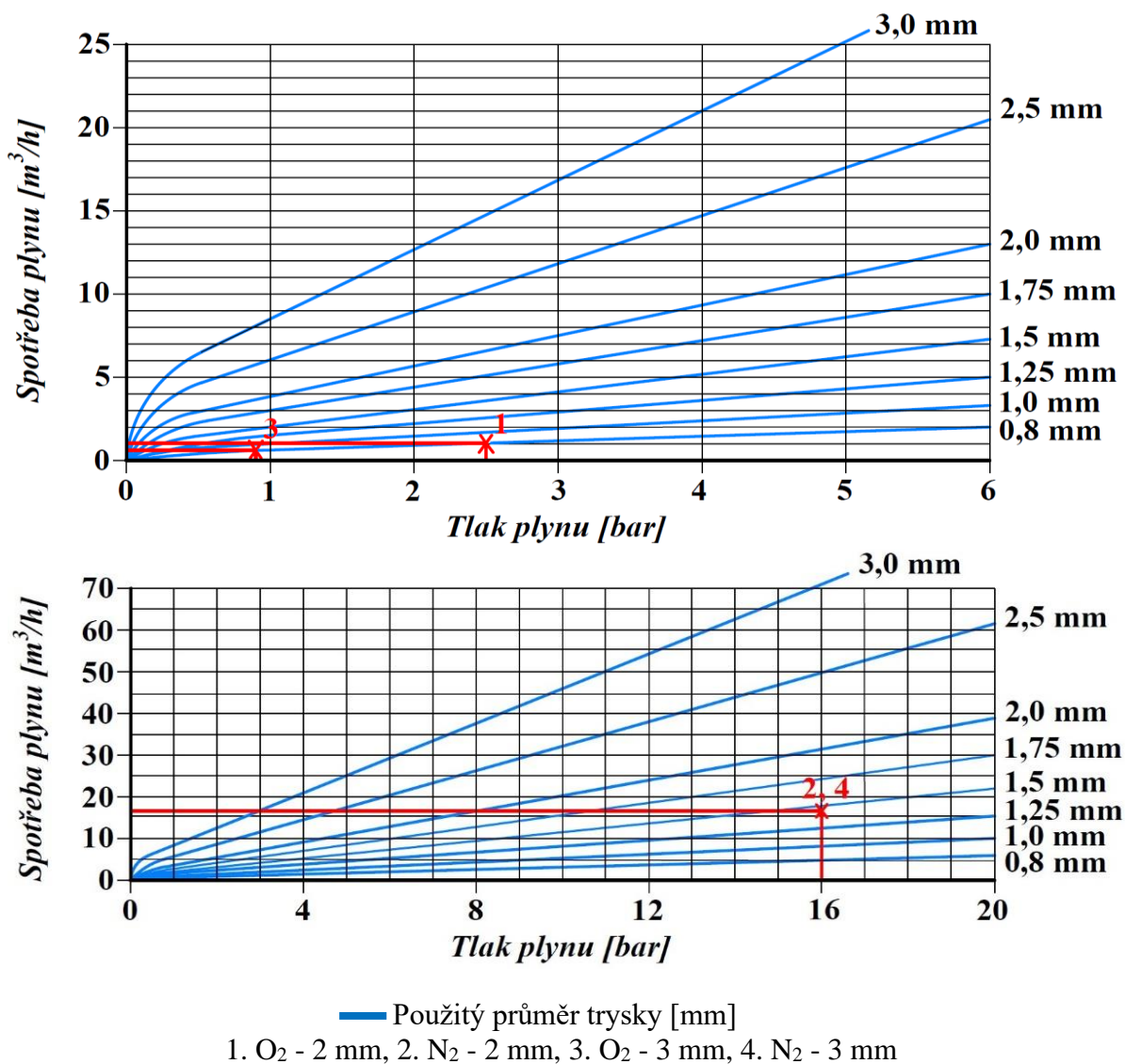
4.4 Vyhodnocení experimentu [36]

Rozdíly v drsnosti řezu materiálu DC01 laserově děleným plyným CO₂ laserem, které byly získány v experimentu jsou zobrazeny na obr. 34 a obr. 35. Při použití oxidační metody je drsnost povrchu nižší, protože kyslík použitý při této metodě vynáší roztavený kov ven z řezné spáry. Roztavený kov obaluje řeznou spáru spolu s okujemi, díky kterým je drsnost při oxidační metodě daleko nižší než při metodě tavné. Rozdíly drsností obou metod jsou také vyneseny v grafu Rz5 v závislosti na tloušťce materiálu dle normy ČSN EN ISO 9013 (obr. 36). Všechny naměřené hodnoty Rz spadají do tolerančního pole 1. Z toho plyne, že pro obě tloušťky a obě metody dělení spadají drsnosti do nejnižší třídy.

Další, velice významné ovlivnění drsnosti řezu jsou řezné parametry, které byly vyňaté z použitého 4 kW laseru TRUMPF TrueLaser 3030. Zde si lze povšimnout, že výkon při oxidační metodě je až čtyřnásobně nižší než výkon u metody tavné. Takto nízkou hodnotu

výkonu má za následek exotermická reakce. Toto doplňkové spalné teplo napomáhá k výraznému snížení výkonu a tlaku plynu, nebo také ke zvýšení řezné rychlosti.

Druh řezného plynu a jeho tlak má zásadní vliv jak na jakost řezu, tak i na ekonomiku celé výroby. Platí, že čím vyšší je tlak, tím je vyšší i spotřeba. Grafické znázornění na obr. 37 poukazuje spotřebu plynu při dané tloušťce řezu, pro daný průměr trysky. Toto grafické znázornění udává Švýcarský výrobce laserových zařízení Bystronic pro typ BySprint Fiber. Pro Německého výrobce TRUMPF jsou tyto grafy téměř totožné.



Obr. 37 Spotřeba řezného plynu v závislosti na jeho tlaku pro daný průměr trysky [36]

Z ekonomického hlediska je pro samotné laserové řezání bez následných operací vhodnější oxidační metoda než metoda tavná a to z důvodu cenové dostupnosti řezného plynu. Při oxidační metodě se používá nižší tlak plynu a řezná tryska o menším průměru, což vede k celkově nižší spotřebě plynu při samotném řezání. Právě z obr. 37 si lze povšimnout, že samotná spotřeba plynu dusíku, vyznačeného v grafu jako 2 a 4 vychází cca 16 m³/hod, přičemž spotřeba kyslíku je zhruba 16x menší (v grafu 1 a 3). Pokud by byly zvoleny další operace po oxidačním řezání, jako je např. svařování, různé povrchové úpravy apod., je nutné provádět další operace na odstranění okují z řezné hrany. Proto z tohoto hlediska je mnohem lepší zvolit metodu tavnou, jelikož hrany řezu jsou čisté a samotná cena řezání nepřevýší cenu za přídatné operace.

5 ZÁVĚRY

První polovina této práce je věnována teorii, která je rozdělena do několika částí. První část popisuje fyziku a vlastnosti laserového paprsku, rozřazení laserů podle aktivního prostředí rezonátoru nebo využití laserového paprsku ve strojírenství. V laserové technologii se podrobněji rozebírá laserové řezání, jelikož tato technologie byla jednou z hlavních náplní experimentu. Závěr teoretické části se věnuje drsnosti povrchu a jejím parametrům, kde je mimo jiné okrajově vysvětlena norma ČSN EN ISO 9013, která je úzce spjata s laserovým řezáním a s drsností řezných hran.

Druhá polovina práce je věnována experimentu, jehož cílem bylo laserovou technologií vyřezat vzorky do nízkouhlíkové oceli DC01 tloušťky 2 a 3 mm, a to nejprve metodou oxidační a poté metodou tavnou. K experimentu byl použit zcela automatizovaný plynný CO₂ laser, který byl poskytnut, spolu s materiálem, firmou LASERCORE s.r.o., která sídlí ve Vyškově. Důležitým parametrem byl výběr kvalitního materiálu bez povrchové koroze, a dále pak byl kladen důraz především na stanovení řezných parametrů laseru, aby řez byl co nejdokonalejší. Poslední část experimentu se odehrávala na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky sídlící v Brně. Zde se provádělo měření drsnosti řezných hran kontaktním profilometrem, ze kterého se vyhodnotily následné parametry drsnosti Ra a Rz. Tyto hodnoty parametrů byly následně graficky vyhodnoceny a zařazeny do tolerančního pole grafického znázornění Rz5 v závislosti na tloušťce materiálu, který je dán normou ČSN EN ISO 9013. Všechny hodnoty Rz pro tloušťky materiálu 2 a 3 mm vyřezané metodou oxidační i tavnou spadají do nejlepší třídy 1, jedná se tedy o nejnižší možné drsnosti dle normy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Citace.com* [online]. 2009 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: www.citace.com
2. BENKO, B., FODEREK, P., KOSECEK, M., BIELAK, R. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9
3. POKORÁK, Milan. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5174>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.
4. ZLESÁK, Jakub. *Trendy vývoje LASERové technologie*. Brno, 2008. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2878>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel Osíčka.
5. *Interferometrie – měření světlem*. Dostupné také z: <https://slidetodoc.com/interferometrie-men-svtlem-vlnov-podoba-svtla-bl-svtlo/>. Ústav přístrojové techniky AV ČR.
6. INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39787. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osíčka, Ph.D.
7. Stimulated emission. *Wikipedia* [online]. 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated_emission
8. *LAO Lasery a Optika* [online]. 2011 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/>
9. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 2010. Dostupné také z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf> Univerzita Palackého v Olomouci.
10. VOJTA, Filip. *Princip laseru*. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
11. VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. ISBN 80-85849-56-9.
12. DRÁBEK, Michal. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54189. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
13. *FJFI ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>

14. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
15. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *MEGABLOG* [online]. 2013 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
16. Technologické lasery. *CWS ANB* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
17. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>
18. MRŇA, Libor. *Dělení materiálů laserem*. Ústav přístrojové techniky AV ČR.
19. *TRUMPF* [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
20. Trysky pro vláknový laser. *FIT Eurazio* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/trysky-pro-vlaknove-lasery/tryska-raytools-pro-vlaknovy-laser-2mm-medena>
21. SEIDL, Ladislav. *Úprava laserového zařízení pro možnost navařování*. Praha, 2017. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68814/F2-BP-2017-Seidl-Ladislav-BP_SEIDL.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT - Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Brajer.
22. ZAJÍC, Jiří. *Porovnání vlastností tupých svarů svařených laserem a plazmou pro austenitickou a feritickou korozivzdornou ocel*. Brno, 2018. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173919. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
23. DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem*. Brno, 2013. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64576. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
24. *LASCAM systems* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/>
25. Laserové kalení. *LASER THERM* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-kaleni>
26. Laserové povlakování. *Výzkumné centrum NTC* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/laserove-zpracovani-povrchu/technologie/laser-cladding>
27. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.

28. PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30527. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
29. NOVÁK, Jiří. *Funkční plochy a struktura povrchu*. Brno, 2008. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/4337>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Pavel Svoboda, CSc.
30. JÁNKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu I*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
31. Měření drsnosti. *M&B Calibr* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
32. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. 2019.
33. ČSN 41 1321. *Ocel 11 321*. 1987.
34. ČSN EN 10130. *Ploché výrobky z hlubokotažných ocelí válcované za studena k tváření za studena – Technické dodací podmínky*. 2007.
35. Laser cutting. *Baltic Steelarc* [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://balticsteelarc.ee/nb/services/laser-cutting/>
36. *Bystronic* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.bystronic.ch/de/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Legenda	Jednotka
a	tloušťka řezu	[mm]
A	tažnost	[%]
c	směr posuvu	[-]
E ₁	dolní energetická hladina	[J]
E ₂	horní energetická hladina	[J]
h	Plancova konstanta	[J·s]
k	kluzová rýha	[mm]
ln	vyhodnocovaná délka	[μm]
lr	základní délka	[μm]
lt	celková délka	[μm]
m	šířka skluzové rýhy	[mm]
n	skluz	[mm]
o	hloubka drážky	[mm]
P	výkon	[W]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rc	průměrná výška prvků profilu	[μm]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rku	špičatost posuzovaného profilu	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rp	největší výška výstupního profilu	[μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
Rsk	šikmost posuzovaného profilu	[μm]
RSm	průměrná šířka prvků profilu	[μm]
Rt	celková výška profilu	[μm]
Rv	největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rz	největší výška profilu	[μm]
Rz5	průměrná výška prvků profilu	[μm]
s _x	směrodatná odchylka	[-]
T	teplota	[°C]
v	frekvence záření	[Hz]
\bar{x}	aritmetický průměr	[-]
Xs	šířka prvku profilu	[μm]
Zp	výška výstupku profilu	[μm]
Zt	výška prvku profilu	[μm]
Zv	hloubka prohlubně profilu	[μm]
λ	vlnová délka	[μm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Srovnání bílého světla se světlem laseru [5]	10
Obr. 2 Schéma stimulované emise [7]	11
Obr. 3 Schéma vzniku laserového paprsku [8]	11
Obr. 4 Schéma pevnolátkového laseru [15]	12
Obr. 5 Schéma Nd: YAG laseru [15]	13
Obr. 6 Princip vláknového laseru [15]	13
Obr. 7 Schéma plynového laseru [15]	14
Obr. 8 Schéma polovodičového laseru [15]	15
Obr. 9 Procentuální zastoupení jednotlivých laserových technologií v průmyslu [17]	16
Obr. 10 Schéma principu laserového řezání [8]	17
Obr. 11 Srovnání řezných hran oxidační 3A a tavné 3B metody	18
Obr. 12 Srovnání ohniskové polohy pro oxidační (nalevo) a tavnou (napravo) metodu [18] .	18
Obr. 13 Schéma laserového paprsku [18]	19
Obr. 14 Schéma trysky [20]	20
Obr. 15 Grafické znázornění řezné rychlosti závislé na tloušťce materiálu [18]	20
Obr. 16 Schéma metod indukčního (nalevo) a hlubokého (napravo) svařování [8]	21
Obr. 17 Schéma kalících teplot pro klasické a laserové kalení v Fe ₃ C diagramu [24]	22
Obr. 18 Profil povrchu [27]	23
Obr. 19 Struktura povrchu [28]	23
Obr. 20 Profil drsnosti [30]	24
Obr. 21 Prvek profilu [30]	24
Obr. 22 Největší výška profilu (Rz) [30]	25
Obr. 23 Průměrná aritmetická úchylka (Ra) [30]	25
Obr. 24 Průměrná šířka prvků profilu (RSm) [30]	26
Obr. 25 Schéma kontaktního profilometru [30]	27
Obr. 26 3D struktura povrchu vytvořena bezkontaktním profilometrem [30]	27
Obr. 27 Skluzová rýha [32]	28
Obr. 28 Graf Rz5 v závislosti na tloušťce materiálu dle normy ČSN ISO 9013 [32]	28
Obr. 29 Schéma vyřezaných zkušebních vzorků	29
Obr. 30 Řezné hrany oxidační (nalevo) a tavné (napravo) metody tloušťky 3 mm	30
Obr. 31 Plyný CO ₂ laser TRUMPF TrueLaser 3030 [35]	30
Obr. 32 Schéma postupu měření	31
Obr. 33 Schéma přístroje MarSurf při měření vzorku	31
Obr. 34 Graf Ra v závislosti na tloušťce materiálu při použití daného řezného plynu	32
Obr. 35 Graf Rz v závislosti na tloušťce materiálu při použití daného řezného plynu	33
Obr. 36 Vynesené naměřené hodnoty do grafu dle normy ČSN EN ISO 9013 [32]	33
Obr. 37 Spotřeba řezného plynu v závislosti na jeho tlaku pro daný průměr trysky [36]	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Spektrum elektromagnetických vln [6], [7]	10
Tab. 2 Základní vlastnosti oceli ČSN 11 321 [33], [34]	29
Tab. 3 Základní řezné parametry	30
Tab. 4 Naměřené parametry drsnosti	32

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka řezných parametrů

Příloha 2 Celková tabulka naměřených hodnot

Příloha 1

Tabulka řezných parametrů

	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
Tloušťka materiálu [mm]	2	2	3	3
OBECE				
Tloušťka materiálu [mm]	2	2	3	3
Ø trysky [mm]	0,8	1,4	0,8	1,4
Ohnisková vzdálenost [in]	5	5	5	5
Proplachování plynem před zápich [s]	0	6	8	6
Proplachování plynem před řezáním [s]	0	1	8	1
ŘEZÁNÍ - VELKÝ OBRYS				
Hodnota nastavení FocusLine [mm]	0	-2	0,5	-1,7
Výkon laseru [W]	850	3600	1500	3750
Spínací frekvence [Hz]	10000	10000	10000	10000
Rychlost [m/min]	4	5	3,6	3,4
Vzdálenost trysky [mm]	0,7	0,7	0,8	0,7
Tlak plynu [bar]	2,5	16,0	0,9	16,0
ZAPICHOVÁNÍ NORMALNĚ PierceLine				
Hodnota nastavení FocusLine [mm]	-1	-2,3	-0,5	-2,8
Doba zapichování [s]	0,05	0,15	0,06	0,3
Číslo rampového cyklu	1	0	4	1
Vzdálenost trysky [mm]	2,5	3	3	3
Doba vyfukování po zápichu [s]	0	0	0,1	0,1
Druh plynu	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
Tlak plynu [bar]	2	3	2	3
Rychlost upravená potenciometrem [%]	95	95	95	95
Tlak plynu upravený potenciometrem [bar]	2,5	16	0,7	15,8
Čas [s]	47,55	43,89	57,54	57,91

Příloha 2

Celková tabulka naměřených hodnot

Řezný plyn	Tloušťka materiálu [mm]	Vzorek	Parametr	Drsnost [μm]				Průměrná drsnost [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
				I.	II.	III.	IV.		
O ₂	2	1. vz.	Ra	0,234	0,304	0,384	0,447	0,342	0,093
			Rz	1,084	1,61	2,621	2,688	2,001	0,785
		2. vz.	Ra	0,246	0,3	0,29	0,227	0,266	0,035
			Rz	1,107	1,342	1,819	1,378	1,412	0,297
N ₂		1. vz.	Ra	0,838	0,764	0,965	0,905	0,868	0,087
			Rz	4,933	3,572	4,342	4,205	4,263	0,559
		2. vz.	Ra	0,797	0,895	0,811	0,841	0,836	0,043
			Rz	4,315	4,706	5,029	4,23	4,570	0,370
O ₂	3	1. vz.	Ra	0,241	0,163	0,24	0,226	0,218	0,037
			Rz	1,088	0,963	1,157	1,221	1,107	0,110
		2. vz.	Ra	0,187	0,194	0,168	0,224	0,193	0,023
			Rz	0,831	1,072	0,831	1,227	0,990	0,194
N ₂		1. vz.	Ra	1,041	1,048	1,343	1,022	1,114	0,153
			Rz	5,538	5,325	6,453	5,792	5,777	0,489
		2. vz.	Ra	0,802	1,159	0,874	0,963	0,950	0,154
			Rz	4,422	5,622	4,611	5,289	4,986	0,564